



TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio de la utilización de Sistema
Tomográfico para análisis de porosidad

GRADO INGENIERÍA MECÁNICA

(2015-2016)

Autor: Diego Prieto Palacin

Tutor Académico: Dr. José Luis Cantero Guisández

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a la Universidad Politécnica de Poznan, en concreto a Bartosz Gapinski, permitirme acceder a los recursos de la Universidad y ayudarme a realizar este proyecto.

Agradecer al Dr. José Luis Cantero Guisández por aceptar ser mi tutor y ayudarme a lo largo de este cuatrimestre a concluir con éxito la carrera.

Me gustaría dar las gracias a toda mi familia, en especial a mi madre y mi hermana, por apoyarme durante todos estos años y animarme hasta en los peores momentos. Me han enseñado que todo es posible con dedicación y esfuerzo, y a luchar por lo que merece la pena.

“Anyone who has never made a mistake has never tried anything new”

Albert Einstein (1879-1955)

RESUMEN

La presente Memoria corresponde a la verificación de la precisión de la Tomografía Computarizada, CT, en el análisis y medición de porosidad en piezas de aluminio fundido.

Se van a diseñar diferentes piezas de aluminio con microagujeros en su superficie que simularán la porosidad del material. Para que el software CT detecte dichos microagujeros como porosidades internas es necesario que se encuentren en el interior de un sólido. Se unirán dos piezas de aluminio, quedando los microagujeros encerrados entre las superficies, para simular un único sólido y poder realizar el análisis de porosidad.

Para asegurar el correcto posicionamiento de las piezas de aluminio se diseñará un soporte de plástico en cuyo interior se introducirán las muestras. Dicho soporte debe asegurar la unión entre las piezas evitando espacios entre ellas y movimientos indeseados.

Se realizarán diferentes análisis Tomográficos sobre el dispositivo creado. Se crea una imagen 3D que permite el análisis de porosidad de las muestras. Una vez se han detectado los microagujeros que se habían creado en las muestras, es posible medirlos mediante el software correspondiente.

Para demostrar la precisión de la Tomografía Computarizada se comparan los datos obtenidos con las mediciones que se obtendrán con el uso de topografía. En este proyecto se emplearán como métodos de verificación topográfica la perfilometría óptica y el microscopio digital, métodos ópticos de gran precisión.

Palabras clave: Tomografía Computarizada/ Aleación de Aluminio/ Ensayo No Destructivo

ABSTRACT

This report refers to the verification of the accuracy of Computed Tomography, CT, in analyse and measure porosity in aluminium castings.

Some micro-holes will be drilled in the aluminium parts in order to simulate the porosity of the material. It is needed to join two metal parts to simulate the micro-holes as internal porosity in one unique piece, so the CT software will detect them and it will be possible to make the porosity analysis.

To ensure the correct positioning of the metal parts, a plastic support is designed. The metal parts will be inside the support to avoid gaps between them and undesirable movements.

Different analysis of the piece will be made. A 3D image is created so it is possible to make the porosity analysis. Once the micro-holes are detected is possible to measure them.

To verify the accuracy of the CT, the results will be compared with topography measurements. In this project are used Optical Profiler and Digital Microscope as accuracy methods of topography.

Key words: Computed Tomography/ Aluminium Castings/ Non Destructive Test

ÍNDICE DEL PROYECTO

1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1- MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	13
1.1.1- MOTIVACIÓN.....	13
1.1.2- OBJETIVOS	14
1.2- PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO	15
1.3- ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	16
2. ALEACIONES DE ALUMINIO Y POROSIDAD.....	18
2.1-RASGOS GENERALES DEL ALUMINIO	18
2.2- CLASIFICACIÓN ALEACIONES DE ALUMINIO	19
2.3- TIPOS DE FUNDICIÓN.....	22
2.4- DEFECTOS EN PIEZAS COLADAS	26
2.5- POROSIDAD	28
2.6- ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA ANALIZAR POROSIDAD.....	31
3. TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA.....	36
4. METODOLOGÍA Y PUESTA A PUNTO	39
4.1- MATERIAL UTILIZADO	39
4.2- DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LAS PIEZAS DE ALUMINIO	44
4.3- DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL SOPORTE.....	47
4.3.1- ALTERNATIVAS DE DISEÑO	48
4.3.2- DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SOPORTE.....	51
4.3.3- IMPRESIÓN DE LAS PIEZAS	55
4.3.4- CONSTRUCCIÓN DEL SOPORTE.....	57
4.3.5- PRESUPUESTO	58

4.4.- VERIFICACIÓN DE LA POROSIDAD DE LAS PROBETAS MEDIANTE MÉTODOS CONVENCIONALES – TOPOGRAFÍA	60
4.4.1.- PERFILÓMETRO ÓPTICO	60
4.4.2.- MICROSCOPIO DIGITAL	65
5. VALIDACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA	68
5.1- OPERACIÓN DEL TOMÓGRAFO	68
5.1.1- POSICIONAMIENTO.....	68
5.1.2-COMPROBACIÓN DE CALIBRACIÓN DEL EQUIPO	69
5.1.3- OPERACIÓN DEL TOMÓGRAFO	71
5.1.4- RECONSTRUCCIÓN 3D	72
5.2- MEDICIONES TOMOGRÁFICAS	74
5.2.1- REDISEÑO DEL SOPORTE	75
5.3- ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	89
5.4- COMPARACIÓN RESULTADOS TOPOGRÁFICOS	90
6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	93
6.1- CONCLUSIONES.....	93
6.2- LÍNEAS FUTURAS.....	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
ANEXO A: PLANOS.....	101
ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Colada por gravedad en arena [16].</i>	23
<i>Figura 2: Colada por gravedad en coquilla [17].</i>	24
<i>Figura 3: Colada por presión [14].</i>	25
<i>Figura 4: a) Llenado incompleto; b) Junta fría; c) Gránulos fríos; d) Cavidad por contracción; e) Micro porosidad; f) Desgarramientos calientes [23].</i>	27
<i>Figura 5: a) fisura de nitrógeno; b) porosidad por oxígeno; c) poros de hidrógeno; d) sopladuras [18].</i>	31
<i>Figura 6: Ensayo metalográfico [26].</i>	32
<i>Figura 7: Principio de operación de la radiografía; Porosidad agrupada examinada por método radiográfico [27, 28].</i>	34
<i>Figura 8: Principio de operación ultrasonido [28].</i>	35
<i>Figura 9: Emisor de rayos X [36].</i>	37
<i>Figura 10: Operación del tomógrafo [33].</i>	38
<i>Figura 11: Análisis de porosidad mediante Tomografía Computarizada [32].</i>	39
<i>Figura 12: Impresora 3D.</i>	40
<i>Figura 13: Durómetro.</i>	40
<i>Figura 14: Perfilómetro.</i>	41
<i>Figura 15: Microscopio Digital.</i>	42
<i>Figura 16: Tomógrafo empleado.</i>	42
<i>Figura 17: Preparación de piezas de aluminio para operación de aplanado.</i>	46
<i>Figura 18: a) Piezas con agujeros; b) Posición de los microagujeros; c) Posicionamiento de las dos piezas de aluminio.</i>	47
<i>Figura 19: Diseño soporte alternativo 1.</i>	48
<i>Figura 20: Diseño soporte alternativo 2.</i>	49
<i>Figura 21: Diseño soporte alternativo 3.</i>	50
<i>Figura 22: Soporte definitivo.</i>	51
<i>Figura 23: Tubo de plástico.</i>	52
<i>Figura 24: Base del soporte.</i>	52
<i>Figura 25: Cubierta superior del soporte.</i>	53
<i>Figura 26: Cubierta tuerca del soporte.</i>	54

<i>Figura 27: Explosionado y conjunto soporte: 1) Tornillo; 2) Cubierta tuerca; 3) Tuerca; 4) Cubierta superior; 5) Piezas metálicas; 6) Tubo de plástico; 7) Base.</i>	54
<i>Figura 28: Impresión de cubierta superior: boca abajo (izquierda) y boca arriba (derecha).</i>	55
<i>Figura 29: Impresión finalizada de la base.</i>	56
<i>Figura 30: Piezas defectuosas: Cubierta superior (izquierda), cubierta tuerca (derecha).</i>	56
<i>Figura 31: Piezas impresas: Cubierta superior, cubierta tuerca y base.</i>	57
<i>Figura 32: Piezas del soporte.</i>	58
<i>Figura 33: Ensamblaje final.</i>	58
<i>Figura 34: Perfilómetro Óptico.</i>	61
<i>Figura 35: Sección de microagujeros 3D.</i>	61
<i>Figura 36: Reconstrucción 3D área de interés.</i>	61
<i>Figura 37: Área extraída del conjunto.</i>	62
<i>Figura 38: Medida de diagonales de un poro.</i>	63
<i>Figura 39: Extracción del perfil.</i>	63
<i>Figura 40: Medición de la profundidad.</i>	64
<i>Figura 41: Vista de los microagujeros con el microscopio digital.</i>	66
<i>Figura 42: Visualización de un poro bajo microscopio digital.</i>	66
<i>Figura 43: Medición con microscopio digital.</i>	67
<i>Figura 44: Posicionamiento del soporte en el tomógrafo.</i>	69
<i>Figura 45: Errores de medida de distancia no compensados y compensados [48].</i>	70
<i>Figura 46: Análisis de la barra de bolas calibrada.</i>	70
<i>Figura 47: Visualización en vivo de la probeta, selección de área, ajustes de funcionamiento e Histograma.</i>	72
<i>Figura 48: Reconstrucción 3D con filtros aplicados.</i>	73
<i>Figura 49: a) vista perfil 1; b) vista perfil 2; c) interior del cilindro (poros).</i>	74
<i>Figura 50: Rediseño de la base.</i>	76
<i>Figura 51: Rediseño cubierta superior.</i>	77
<i>Figura 52: Rediseño de la cubierta tuerca.</i>	77
<i>Figura 53: Rediseño; a) base; b) cubierta superior; c) cubierta tuerca; d) tubo de plástico; e) montaje final.</i>	78
<i>Figura 54: Posicionamiento del soporte con emisor grande.</i>	79

<i>Figura 55: Histograma test 2. Valor mínimo 909>200.</i>	80
<i>Figura 56: Reconstrucción 3D test 2.</i>	80
<i>Figura 57: a) Posicionamiento del soporte; b) Visualización porosidad tras reconstrucción.</i>	81
<i>Figura 58: Reconstrucción test 4.</i>	82
<i>Figura 59: Detección de porosidad en test 4.</i>	83
<i>Figura 60: Reconstrucción test 5.</i>	83
<i>Figura 61: Reconstrucción test 6.</i>	84
<i>Figura 62: Análisis de porosidad test 6.</i>	85
<i>Figura 63: Test 7: a) Análisis porosidad; b) Reconstrucción 3D.</i>	86
<i>Figura 64: Planos de la reconstrucción 3D del test 7.</i>	87
<i>Figura 65: Poro G1 a) diagonal 1; b) diagonal 2.</i>	87
<i>Figura 66: Poro G1; Medida de profundidad.</i>	88
<i>Figura 67: Imagen 3D de poro en Perfilómetro.</i>	92

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Duración de las fases del proyecto.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2: Cálculo teórico de las dimensiones de los poros.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 3: Precio PLA.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 4: Medidas del perfilómetro.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 5: Medidas del microscopio digital.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 6: Medición de porosidad mediante Tomografía Computarizada.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 7: Diferencia de resultados Tomografía - teórico.</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 8: Comparación resultados: Tomografía - Perfilometría.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 9: Comparación resultados: Tomografía-Microscopio.</i>	<i>92</i>

SIGLAS

CAD – Computed Aided Design

3D – Tres Dimensiones

END – Ensayos No Destructivos

CT – Tomografía Computarizada

1. INTRODUCCIÓN

Numerosos trabajos experimentales [1] realizados durante los últimos treinta años han logrado relacionar la porosidad de las muestras de distintas aleaciones de aluminio con sus propiedades mecánicas, tales como resistencia a tracción, límite elástico, etc.

Por otra parte, la respuesta mecánica de las aleaciones depende de muchos otros factores como son la composición química, el tamaño y volumen de las fases ricas en hierro, la modificación o no del silicio y el tamaño de celda dendrítica. Tanto la porosidad como muchos de estos factores se ven modificados por las mismas variables, como es la velocidad de enfriamiento y el tiempo local de solidificación. Debido a esto es prácticamente imposible determinar con precisión la influencia específica de la porosidad sobre las propiedades mecánicas del material [1,2].

Por la complejidad de predecir la porosidad en las piezas aleadas de aluminio, resulta muy interesante poder observar y medir los poros en las zonas de interés. En la presente memoria se relatan los trabajos realizados para el desarrollo de un sistema capaz de determinar la porosidad en aleaciones de aluminio por medio de un proceso de Tomografía Computarizada. Además se demostrará que el uso de este método permite visualizar y analizar la geometría total de los poros; así como, la posibilidad de crear un modelo en 3D de la muestra. Por último, exportando el modelo tridimensional como un archivo CAD (Computer Aided Design), se podrá realizar un posterior análisis mediante elementos finitos. El trabajo experimental relativo a este proyecto ha sido elaborado en las instalaciones de la Universidad Politécnica de Poznan, apoyado por el profesor Bartosz Gapinski, y tutorizado por el Dr. José Luis Cantero Guisández, de la Universidad Carlos III de Madrid.

Este primer capítulo se divide en tres bloques fundamentales. En primer lugar, se expone la motivación para el desarrollo de este trabajo así como los objetivos a cumplir para el correcto desarrollo del proyecto. A continuación se detalla esquemáticamente el tiempo estimado que requiere cada fase del proyecto. Por último, se define la estructura que se ha seguido en la elaboración del documento.

1.1- MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

Una vez descrito brevemente el tema de estudio de este proyecto, en este apartado se describen la motivación y objetivos planteados para la realización del mismo.

1.1.1- MOTIVACIÓN

La porosidad de los materiales es un defecto que tiene una repercusión importante en el comportamiento mecánico de los mismos. En aleaciones de aluminio de moldeo, es causada por contracción y por hidrógeno; y es prácticamente inevitable.

Hay numerosos estudios y métodos que permiten combatir la porosidad creada durante el proceso de colada, principalmente la porosidad creada por hidrógeno, pero implican un gran gasto económico.

La porosidad se ve altamente alterada en función principalmente de la velocidad de enfriamiento y otras condiciones operativas durante el moldeo. Estas variables modifican las características microestructurales de las muestras haciendo casi imposible determinar la porosidad de la pieza colada y, a su vez, su contribución a las propiedades mecánicas. Es interesante conocer la porosidad del material con el que se va a trabajar, sobre todo en las zonas que soportan más esfuerzo [1], ya que si la porosidad cambia su comportamiento mecánico también lo hará.

Son numerosos los trabajos experimentales realizados intentando relacionar las propiedades mecánicas con la porosidad de la muestra; pero sus resultados son muy dispares y en ocasiones contradictorios y confusos entre los diferentes autores [1]. En ninguno de ellos se ha llegado a plantear un modelo que permita cuantificar de forma precisa la influencia de la porosidad en las propiedades mecánicas.

Los trabajos realizados anteriormente en este campo se diferencian principalmente en función de la variable de porosidad a estudiar: porosidad volumétrica global o porosidad en el área de fractura.

La porosidad volumétrica global representa la porosidad de una zona mucho mayor que el área de rotura. Esta no es representativa, pues no tiene en cuenta la zona de rotura y ahí es donde la porosidad influye directamente a la rotura prematura [1-2].

La complejidad de predecir la porosidad de las piezas aleadas de aluminio hace que desarrollar este proyecto haya sido todo un reto y una enorme fuente de aprendizaje.

El método propuesto para analizar la porosidad de las muestras es la Tomografía Computarizada. Un tipo de ensayo no destructivo que permitirá observar y medir los poros en las zonas de interés.

1.1.2- OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto es analizar la precisión y utilidad de la Tomografía Computarizada a la hora de estudiar y medir la porosidad en aleaciones de aluminio.

Para el correcto desarrollo de este proyecto, el objetivo principal se puede subdividir en objetivos específicos que se corresponden con las diferentes fases de trabajo.

Se pretende estudiar en profundidad las diferentes aleaciones de aluminio y el método de análisis de la porosidad conocido como Tomografía Computarizada.

- Diseñar y fabricar las muestras necesarias para llevar a cabo el análisis tomográfico.
- Diseñar y fabricar el soporte utilizado para unir las piezas de aluminio estudiadas.
- Medir los microagujeros de la muestra de aluminio mediante topografía.
- Realizar el montaje experimental y la calibración del tomógrafo con que se realiza el análisis de la porosidad.
- Demostrar que el uso de este método no destructivo permite visualizar y analizar la geometría total de los poros.
- Crear un modelo en tres dimensiones de la muestra, que permitiría un posterior estudio mediante modelos de Elementos Finitos al exportarlo como un archivo CAD.
- Comparar los datos obtenidos de la Tomografía con las tradicionales mediciones topográficas para comprobar su precisión y utilidad.

1.2- PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO

El trabajo de investigación que se propone consta una fase inicial más teórica relacionada con la documentación sobre el tema y el diseño; y otra parte práctica asociada a la fabricación del sistema experimental y a la medición tomográfica.

De este modo, la planificación de este proyecto se ha dividido en varios módulos que se explicarán a continuación, incluyendo un cálculo aproximado de las horas necesarias para realizar las tareas en las que se desglosa cada fase.

MÓDULO 1: DOCUMENTACIÓN

- Porosidad en aluminio (10 horas).
- Tomografía Computarizada y Ensayos No Destructivos (30 horas).

MÓDULO 2: DISEÑO

- Piezas de aluminio (10 horas).
- Soporte (50 horas).

MÓDULO 3: FABRICACIÓN Y MONTAJE

- Fabricación piezas de aluminio (10 horas).
- Impresión de piezas de plástico (5 horas).
- Montaje (5 horas).

MÓDULO 4: MEDICIONES

- Mediciones topográficas (15 horas).
- Mediciones tomográficas (25 horas).

MÓDULO 5: REALIZACIÓN DE LA MEMORIA

- Teoría, análisis y comparación de resultados (125 horas).
- Revisión y conclusiones (25 horas).

En la tabla 1 se resumen los tiempos de duración de cada módulo. El tiempo total estimado para la elaboración de este proyecto es de 310 horas que, para 12 créditos ECTS, implican un esfuerzo de aproximadamente 26 horas por crédito. También se hace una aproximación en semanas considerando una media de 15 horas semanales.

MÓDULOS	HORAS DE TRABAJO	SEMANAS APROXIMADAS
MÓDULO 1: DOCUMENTACIÓN	40	2,5
MÓDULO 2: DISEÑO	60	4
MÓDULO 3: FABRICACIÓN Y MONTAJE	20	1,5
MÓDULO 4: MEDICIONES	40	2,5
MÓDULO 5: ELABORACIÓN DE LA MEMORIA	150	10
TOTAL	310	20,5

Tabla 1: Duración de las fases del proyecto

1.3- ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La presente memoria ha sido estructurada en los capítulos que se describen a continuación.

1. Introducción: Este apartado trata de enmarcar el desarrollo de este proyecto en su contexto. En primero lugar expone la motivación y los objetivos que se deben cumplir para el desarrollo de este trabajo. A continuación se detalla la planificación del proyecto, dividiéndola en cinco fases. Finalmente, se define la estructura de la presente memoria.

2. Aleaciones de aluminio y porosidad: Comienza exponiendo las principales propiedades del aluminio y los distintos tipos de aleaciones. A continuación se explican los distintos métodos de fundición y los defectos creados durante su fabricación, entre los que destaca el estudio de la porosidad. Por último se analizan los principales métodos actuales para detectar los defectos de las piezas coladas.

3. Tomografía Computarizada: En él se realiza un estudio teórico del uso de la Tomografía Computarizada como método de análisis de la porosidad. Se explicarán tanto el principio de operación de un Sistema Tomográfico como sus aplicaciones.

4. Metodología y puesta a punto: Este capítulo es uno de los focos centrales de este proyecto. Se divide en cuatro grandes bloques. En el primero se detalla el material utilizado a lo largo de este capítulo. A continuación, se expone el diseño y la fabricación de las diferentes piezas de aleaciones de aluminio con diferentes diámetros que van a ser sujeto de análisis. En el tercer bloque, se detalla el diseño del soporte utilizado para unir las dos muestras de aluminio, para lo cual se utilizara un software de CAD; así como el proceso de impresión y montaje del soporte. Por último, se medirán los microagujeros realizados en las piezas de aluminio con el fin de poder usarlos como referencia para validar la Tomografía Computarizada.

5. Validación de la Tomografía Computarizada: Este apartado constituye el otro bloque central del proyecto, el cual se divide de nuevo en cuatro grandes bloques. El primero de ellos describe el proceso de operación del tomógrafo, así como su calibración. En el segundo bloque, se analizará la porosidad mediante técnicas de Tomografía Computarizada, y se realizará una reconstrucción en 3D gracias a la cual se pueden detectar y medir los agujeros gracias al uso de diferentes filtros. Finalmente en los dos últimos apartados se analizarán los resultados obtenidos mediante los distintos métodos y se comprobará la precisión de la Tomografía Computarizada.

6. Conclusiones y líneas futuras: En el último capítulo se recogen las conclusiones extraídas y se emiten los juicios de valor acerca del trabajo realizado tras el estudio de los resultados obtenidos. Se exponen los errores que se han producido a la hora de realizar las mediciones. Se hace también una exposición de las posibles mejoras del experimento y de las líneas futuras de actuación.

2. ALEACIONES DE ALUMINIO Y POROSIDAD

En este capítulo se va a realizar un estudio del aluminio en profundidad. En primer lugar se exponen las propiedades del aluminio así como su obtención e historia. A continuación se clasifican los tipos de aleaciones de aluminio de fundición. Se analizarán los principales métodos de colada de aluminio así como los defectos que generan en las piezas creadas centrándose en la porosidad dado su interés en este proyecto. Por último se muestran los principales ensayos metalográficos para detectar defectos de piezas coladas.

2.1-RASGOS GENERALES DEL ALUMINIO

El aluminio, Al, es uno de los metales más usados en la industria hoy en día, a pesar de ser uno de los últimos metales en ser descubierto, únicamente por detrás del acero. Esto se debe a que es un metal no ferromagnético con baja densidad, alta resistencia a corrosión, maleable, con bajo punto de fusión, fácilmente mecanizable, y buen conductor térmico y eléctrico. A todas estas características cabe añadir que es muy abundante en la corteza terrestre y de bajo coste [3,5].

El aluminio puro no se encuentra en la naturaleza. En 1825 el físico danés Hans Christian Ørsted consiguió aislar por primera vez el aluminio gracias a los avances tecnológicos tales como el uso de la electricidad y nuevas técnicas químicas, aunque seguía conteniendo impurezas. Para obtener aluminio puro son necesarios dos pasos, en primer lugar se obtiene alúmina a partir de bauxita gracias al proceso de Bayer, posteriormente mediante electrólisis se obtiene el aluminio puro [4-6].

El aluminio puro es blando y poco resistente a tracción por lo que para mejorar sus propiedades se alea con pequeñas cantidades de otros elementos tales como magnesio, cobre, manganeso, silicio, zinc y otros elementos. Cada elemento aporta cambios en las propiedades físicas y mecánicas por lo que se usan diferentes aleaciones en función del fin que se le quiera dar [3-7].

El producto final de aluminio se puede obtener por distintos procesos ya sea extrusión, forja, laminación, fundición, doblado, soldadura, etc.

2.2- CLASIFICACIÓN ALEACIONES DE ALUMINIO

Las aleaciones de aluminio se clasifican en función si están destinadas a procesos de conformado o a fundición. Ambas aleaciones son muy similares, la principal diferencia reside en la mayor cantidad de silicio en las aleaciones para fundición. Esto se debe a que el silicio favorece la colada del metal fundido y permite la formación de perfiles complicados, pequeños espesores, y permite mayor fluidez del metal favoreciendo la alimentación, reduciendo grietas y la contracción por endurecimiento (rechupes) [8-10].

Debido a que en este trabajo se trabaja con muestras de aluminio de fundición, en concreto con la aleación A 390.0 T6, se van a analizar este tipo.

A continuación se realiza un breve análisis de las aleaciones de aluminio según las especificaciones AA, nomenclatura empleada en Estados Unidos, que clasifica las aleaciones en series en función del elemento aleante más empleado. El primer dígito identifica la serie, los dos siguientes se emplean para composiciones particulares y por último, después de la coma, se suele situar un 0 que implica que la aleación está destinada a la fundición [8-10].

A continuación se muestran las series que existen:

- **Series 1XX.X:** Sin elementos aleantes. Tiene una pureza mínima del 99%. Esta serie también llamado aluminio puro, presenta excelente resistencia a corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica, y bajas propiedades mecánicas. Las impurezas principales son hierro y silicio. Tiene aplicaciones en campos eléctricos, térmicos, petroquímica, edificación, menaje, etc.

- **Series 2XX.X:** El principal aleante es el cobre, en ocasiones también se añade magnesio como aleante secundario. El cobre proporciona gran dureza a la aleación por lo que esta serie presenta excelentes propiedades mecánicas manteniendo la maquinabilidad y ligereza del aluminio. Presentan buena resistencia al calor pero baja resistencia a corrosión. Es adecuado para piezas y/o estructuras que necesiten alta relación resistencia/peso, así como en suspensión de camiones o fuselaje de aviones.
- **Series 3XX.X:** En estas aleaciones predomina el silicio y puede tener adiciones de cobre o magnesio. Es una de las series más empleadas debido a que el gran contenido de silicio permite la elaboración de perfiles complicados. La aleación es tratable térmicamente, es menos resistente, más maleable y resistente a corrosión. Suele emplearse en cuadros de bicicletas, pasamanos de puentes y aplicaciones arquitectónicas.
- **Series 4XX.X:** El principal aleante es el silicio en cantidades medianamente elevadas, de 5% a 20%, que consigue una menor temperatura de fusión. Esto permite utilizar esta aleación como elemento de soldadura ya que tiene un intervalo de fusión más bajo que el metal base. Tiene mayor dureza y resistencia a corrosión.
- **Series 5XX.X:** En esta serie se utiliza magnesio como elemento aleante. A veces se añade manganeso en pequeñas cantidades para mejorar la dureza. Presenta alto endurecimiento por deformación, menor peso específico que el aluminio puro, buenas propiedades mecánicas, buena resistencia a corrosión y buena soldabilidad. Tiene aplicaciones en adornos decorativos, arquitectónicos, iluminación de calles o estructuras de automóvil entre otros.
- **Series 6XX.X:** Esta serie no se usa en aleaciones de aluminio para fundición.
- **Series 7XX.X:** Esta aleación contiene zinc, entre 1% y 8%. A veces se añade magnesio para hacer posible un tratamiento térmico de la aleación. Presenta baja resistencia a corrosión y tiene alta dureza por lo que sus aplicaciones principales se centran en la aviación o. equipos móviles.

- **Series 8XX.X:** El principal elemento aleante es el estaño.
- **Series 9XX.X:** Esta serie se utiliza para nombrar el resto de posibles aleaciones que no están incluidas en las anteriores.

A parte de la designación numérica a las aleaciones se añade una o varias letras para identificar los estados de tratamiento realizados durante el postprocesado, tanto para aleaciones de conformado como fundidas [10]. A continuación se explican brevemente los tratamientos según la UNE EN 515, centrándose en los tratamientos térmicos dado que el aluminio con el que se trabaja presenta un tratamiento térmico T6.

- F: Bruto de fabricación. Ningún medio de control de las condiciones térmicas o de la acritud.
- O: Recocido. Se obtiene el estado más bajo de resistencia mecánica.
- H: Acritud. Procesos de deformación en frío para obtener características mecánicas específicas. La H va seguido de dos cifras, la primera indica el tipo de proceso termodinámico y la segunda el grado de acritud.
- W: Tratamiento térmico de solución y temple. Se aplica a aleaciones que maduran espontáneamente a temperatura ambiente después del tratamiento de solución y temple. Después de la W es necesario indicar la duración de la maduración natural en horas.
- T: Tratamiento térmico de endurecimiento estructural en los que se aumenta la resistencia mecánica para obtener estados estables. La T va acompañada de una cifra que indica la secuencia de los tratamientos básicos de la siguiente forma:
 - T1: Tratamiento de temple desde la temperatura del conformado en caliente y maduración natural.
 - T2: Tratamiento de temple desde la temperatura del conformado en caliente, acritud y maduración natural.
 - T3: Tratamiento de solución, temple, acritud y maduración natural.
 - T4: Tratamiento de solución, temple y maduración natural.
 - T5: Tratamiento de temple desde la temperatura del conformado en caliente y maduración artificial.
 - T6: Tratamiento de solución, temple y maduración artificial.

- T7: Tratamiento de solución, temple y sobre-maduración/estabilizado.
- T8: Tratamiento de solución, temple, acritud y maduración artificial.
- T9: Tratamiento de solución, temple, maduración artificial y acritud.
- T10: Tratamiento de temple desde la temperatura del conformado en caliente, acritud y maduración artificial.

2.3- TIPOS DE FUNDICIÓN

Como se ha mencionado anteriormente existen diferentes métodos para la obtención de la pieza final de aluminio requerida, tales como extrusión, forja, laminación, etc. A lo largo de este trabajo se han empleado piezas de aluminio fundido por tanto a continuación se expondrán los principales tipos de fundición.

Actualmente el moldeo por fundición de aluminio es el método más empleado para la fabricación de productos. Se debe a que normalmente es un método simple, barato y versátil, aunque depende de diferentes factores como pueden ser el volumen de producción, la complejidad de la pieza o las tolerancias buscadas [11-15].

Hay diferentes métodos de moldeo pero los más importantes y utilizados son moldeo en coquilla por gravedad, moldeo en arena y colada a presión. En todos los procesos de moldeo es inevitable la aparición de defectos, como son los poros, pero no en la misma medida. Estos defectos es importante tenerlos en cuenta ya que aparte de reducir la vida de servicio de la pieza puede ocasionar puntos de concentración de esfuerzos así como fugas cuando está sometido a presión, como puede ser el caso de motores, depósitos, etc [11-15].

➤ **Colada por gravedad sobre molde de arena**

Este método es el más versátil, aguanta altas temperaturas, es económico y el más usado para la producción de piezas de aluminio. Tiene un gran inconveniente y es que tras la producción de la pieza se destruye el molde para extraerla por lo que no es recomendable para altos volúmenes de producción al ser necesario fabricar un molde por cada pieza.

El proceso comienza con la fabricación del molde. Se emplea sílice mezclado con arcilla y agua para aglomerar la mezcla de arena. Se fabrica el molde dividido en dos mitades iguales y se introduce en su interior el modelo de la pieza que se quiere fabricar. Es necesario dejar canales de alimentación (bebedero) y rebosaderos por donde salen los vapores y el metal sobrante. Es posible crear piezas huecas mediante el empleo de machos de arena. La arena debe quedar compacta.

Posteriormente se retira el modelo del molde y se cierran las dos partes quedando preparado para el vertido de metal fundido a través del bebedero. Se suelen emplear líquidos lubricantes para facilitar la extracción de la pieza.

Una vez pasa el tiempo necesario de solidificación se rompe el molde y se extrae la pieza. Será necesario un proceso posterior, proceso de desbarbado, para eliminar el exceso de material (bebedero, mazarotas) y limpiar la pieza de la arena que puede quedar pegada. La arena se puede reutilizar [11-16].

En la Figura 1 se puede ver este proceso.

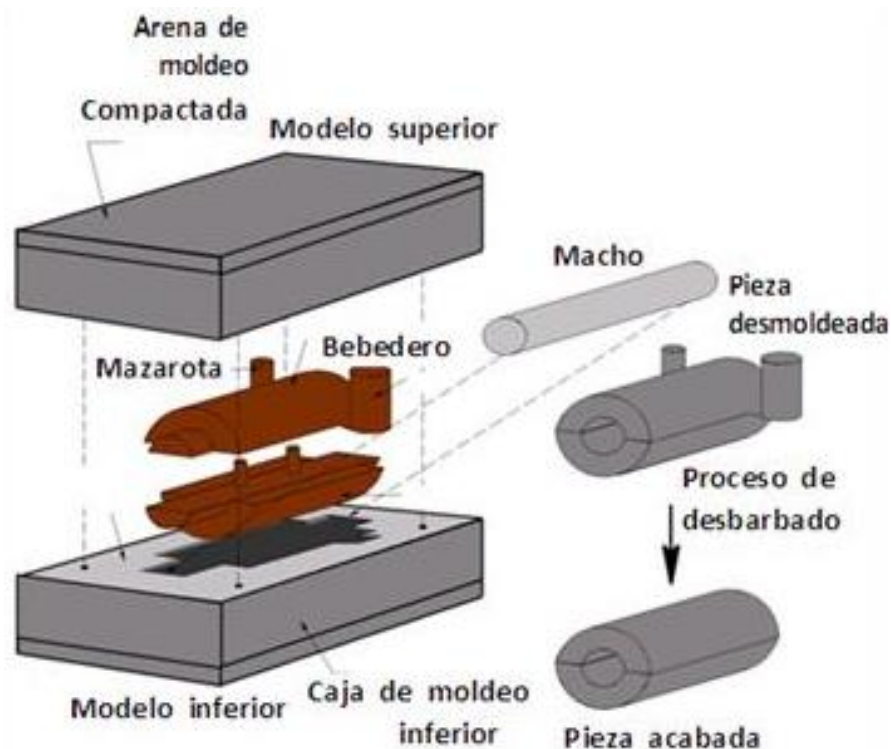


Figura 1: Colada por gravedad en arena [16].

➤ **Colada por gravedad en coquilla**

Las coquillas son moldes metálicos permanentes, esto supone un mayor coste de producción del molde pero es rentable para volúmenes de producción elevados ya que se puede reutilizar el molde para elaborar piezas iguales. Estos moldes suelen estar fabricados de hierro o acero. Mediante este método es posible obtener piezas con mejor acabado, mayor precisión y posee mayor velocidad de enfriamiento.

El proceso de fabricación comienza con el precalentamiento de la coquilla, que consta de dos partes para facilitar la posterior extracción de la pieza. Se vierte el metal fundido, se espera hasta que finalice el proceso de solidificación y por último se extrae la pieza abriendo el molde [11-16].

En la Figura 2 se observa una coquilla con sus partes más importantes.

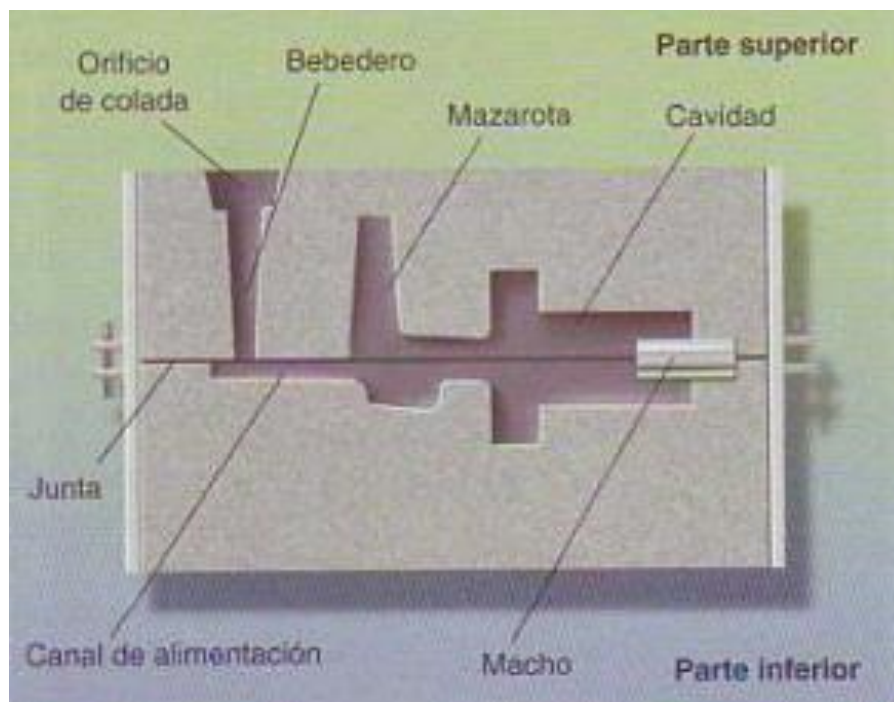


Figura 2: Colada por gravedad en coquilla [17].

➤ **Colada por presión o inyección**

Este método es muy adecuado para grandes volúmenes de producción debido al alto gasto que supone el equipo necesario. También es muy útil cuando se pretende fabricar piezas complicadas con aristas pronunciadas o delgados espesores ya que cuenta con gran precisión. Se obtienen piezas con superficies más limpias y regulares que con los métodos anteriormente descritos y sus propiedades mecánicas mejoran hasta un 20% con respecto al equivalente colado por gravedad.

Este método emplea moldes metálicos permanentes (coquilla o matriz) en los que se inyecta el metal fundido con elevada presión, normalmente mediante un émbolo [11-16].

En la Figura 3 se observa las partes de este método.

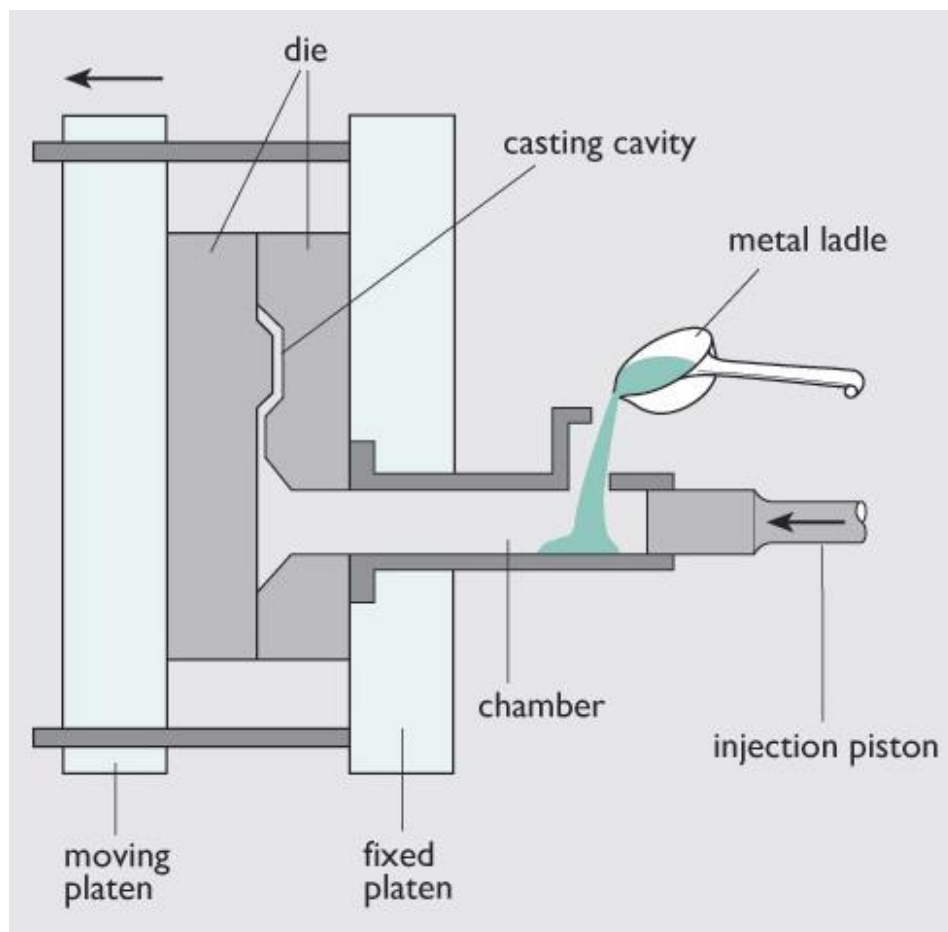


Figura 3: Colada por presión [14].

2.4- DEFECTOS EN PIEZAS COLADAS

En el proceso de fundición aparecen numerosos defectos debido a la gran variedad de variables que influyen en el proceso como son la fusión, colada y solidificación. Estas constituyen un conjunto de operaciones muy complicadas que llevan a la aparición de defectos inevitables aunque si se puede regular y disminuir su aparición mediante el control de variables como la temperatura de vaciado, fluidez del metal fundido, velocidad de vaciado, etc. Es importante el estudio de los defectos en las piezas para comprender su origen y poder corregirlo. El origen de estos defectos reside en el equipo utilizado, el cambio de estado líquido a sólido del metal, el diseño o concepción de la pieza y a las operaciones realizadas durante el proceso [18-22].

Los defectos producen no solo una disminución de las propiedades mecánicas de la pieza sino que también pueden afectar a la forma y superficie de esta.

A continuación se van a analizar algunos de los defectos más comunes e importantes:

➤ Llenado incompleto

Ocurre cuando el metal fundido solidifica antes de llenar por completo la cavidad del molde. Ocurre debido a una baja fluidez del material, baja temperatura de vaciado, baja velocidad de vaciado o una sección transversal del molde muy delgada.

➤ Junta fría

Ocurre cuando dos flujos del metal fundido se vierten al mismo tiempo pero se produce una solidificación prematura de uno de ellos evitando la fusión de los dos flujos. Las causas son similares al llenado incompleto.

➤ Metal granoso o gránulos fríos

Se debe a un vaciado incorrecto. Se producen salpicaduras durante el proceso de vaciado que crean glóbulos de metal que quedan atrapados en la fundición.

➤ Cavidad por contracción

Depresión en la superficie o hueco en el interior. Recibe el nombre de rechupe cuando se produce en la parte superior de la fundición. Este defecto es provocado por la contracción del metal durante el proceso de solidificación. Se debe a una falta de metal fundido en la última región de la pieza que solidifica. Se soluciona fácilmente con el diseño de mazarotas.

➤ Micro porosidades

Este tipo de defectos consiste en pequeños huecos debidos a la contracción por solidificación del último metal fundido en la estructura dendrítica. Este defecto es principalmente importante en aleaciones debido a que la solidificación de estos metales conlleva más tiempo.

➤ Desgarramiento/agrietamiento caliente

Este defecto ocurre cuando la contracción del metal después de la solidificación se ve restringida por el molde produciendo una separación del material en puntos de alta concentración de esfuerzos. Este defecto aparece principalmente en el moldeo en arena.

➤ Inclusiones de arena

Este defecto aparece en moldes de arena debido a un mal compactamiento que provoca el desprendimiento de granos de arena. Es un caso de defecto bastante común en este tipo de moldes. Se aprecia también en la superficie exterior de la pieza donde las erosiones del molde quedan impresas.

En la figura 4 se observa diferentes defectos de los mencionados anteriormente.

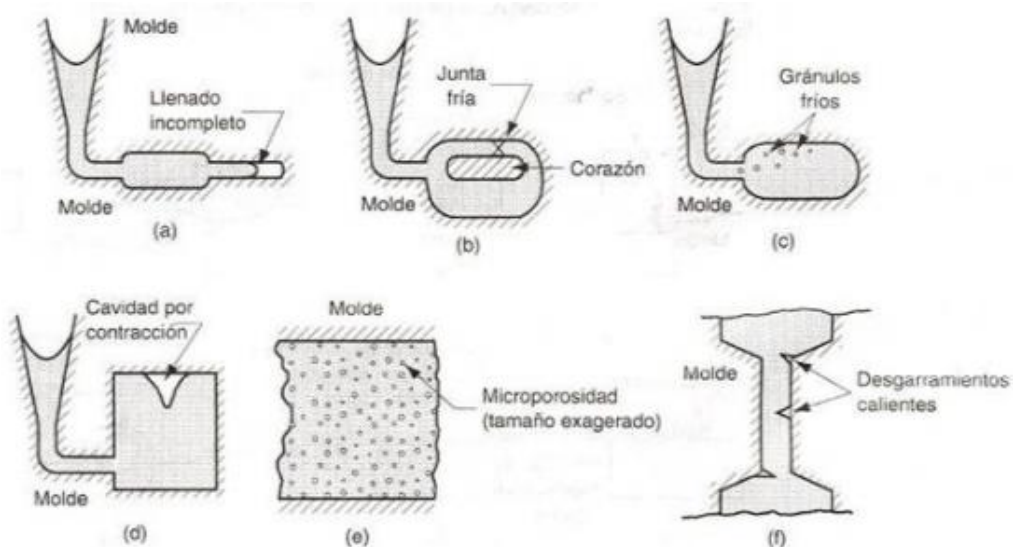


Figura 4: a) Llenado incompleto; b) Junta fría; c) Gránulos fríos; d) Cavidad por contracción; e) Micro porosidad; f) Desgarramientos calientes [23].

2.5- POROSIDAD

La porosidad afecta de forma directa tanto a las propiedades físicas como mecánicas de las piezas repercutiendo en su correcto funcionamiento. Pueden producir fallo prematuro del componente por fatiga, rotura en servicio, agrietamientos, afectar a la terminación superficial o hacer el material permeable, afectando en este caso a la impermeabilidad en elementos sometidos a presión como compresores, bombas, motores, etc [18, 24, 25].

La porosidad aparece durante el proceso de colada y se produce antes de la transformación de líquido a sólido del metal dejando atrapadas estas discontinuidades al alcanzar el estado sólido. Hay dos causas principales de las porosidades; la presencia de gas en el metal líquido que crea porosidades de gas, o la contracción volumétrica del metal durante el enfriamiento y solidificación creando rechupes [18, 24, 25].

➤ Porosidad por contracción del metal

Se produce debido a un cambio de volumen en el metal al pasar de estado líquido a sólido. Las secciones más delgadas de las piezas solidifican antes que las secciones gruesas, esto provoca que una vez empezado el proceso de solidificación en las regiones más gruesas no es posible que el metal líquido llegue a las zonas internas que aún no se han solidificado creando regiones porosas en su centro. Los defectos que se crean reciben el nombre de rechupes. También se pueden crear microporosidades por contracción cuando el metal líquido se contrae entre dendritas y brazos dendríticos.

Se puede obtener cierta información previa sobre la posición preferencial de este tipo de poros debido a que se originan en los centros térmicos de las piezas dado que estos son las últimas zonas de solidificación. Sabiendo esto, es posible modificar la geometría de la matriz mediante la adición de enfriadores internos o externos, que facilitan la solidificación en las zonas críticas, o bien utilizar el metal líquido adecuado para evitar las discontinuidades causadas por la contracción durante la solidificación.

➤ Porosidad de gas

El metal fundido puede contener gases disueltos. La solubilidad del metal se ve alterada debido a los cambios de temperatura durante los procesos de enfriamiento y solidificación tras ser colado en el molde quedando el gas atrapado en su interior.

También es posible la aparición de gas debido a reacciones químicas con los elementos que rodean al metal fundido (molde, cucharas, hornos) incluso después de haber alcanzado el estado sólido. Esto se debe a los fenómenos de difusión y absorción que se ven favorecidos por las altas temperaturas a las que estos procesos ocurren ya que hay una alta energía térmica.

La eliminación de la porosidad de gas se puede controlar mediante un control de la naturaleza de todos los constituyentes que intervienen en el proceso así como la composición química de la aleación utilizada. Los elementos principales que aparecen son el nitrógeno, oxígeno e hidrógeno.

A continuación se van a analizar los tipos de porosidades de gas que pueden aparecer en las aleaciones:

- Fisura de nitrógeno

Aparece principalmente en fundiciones de hierro y acero. Cuando el metal se enfría se reduce su solubilidad y el gas que no logra escapar antes de la solidificación queda atrapado. Presentan una forma redondeada o alargada de hasta 2mm de anchura que puede aparentar ser una grieta, la superficie interna tiene una morfología dendrítica debido a la interrupción del crecimiento de los cristales del metal. Estas cavidades se originan tanto en la superficie como en el interior y normalmente aparecen en agrupaciones.

La presencia de este tipo de porosidad puede favorecer la aparición de rechupes durante el proceso de contracción del material.

- Porosidad por presencia de oxígeno

Aparece principalmente en las fundiciones de acero dado que este tipo de porosidad está relacionada directamente con los niveles de oxígeno activo y su capacidad de oxidación. Cuanto mayor es la energía térmica hay mayor riesgo de que aparezca este tipo de porosidad dado que permite disponer de mayor oxígeno activo en la aleación líquida, por ello es importante controlar los procesos por los que pasa el metal.

Presentan una morfología redondeada o alargada, su interior es liso y se sitúan en las partes superiores de las piezas.

- Poros

Son pequeños orificios que se forman en la superficie, subsuperficie o en las zonas opuestas a las entradas del metal, debido a la formación de burbujas de gas. Presentan una morfología circular con interior liso. Los poros se clasifican en función del gas que los ha originado: hidrógeno, hidrógeno-nitrógeno y monóxido de carbono.

El aluminio tiene más riesgo de aparición de la porosidad de hidrógeno debido a la capacidad de este material para generar dicho gas al reaccionar químicamente con agua, a parte de la variación de la solubilidad durante el enfriamiento del metal líquido. Presentan una forma redondeada, alargada o dendrítica. Dicha forma depende de diferentes factores como el contenido de la aleación o la velocidad de enfriamiento (a menor velocidad mayor tamaño de poros).

Los poros debido al monóxido de carbono se forman cuando el carbón disuelto reacciona con otros elementos como escorias de óxidos. Aparecen por ello en zonas de la pieza con inclusiones no metálicas como puede ser arena o escoria procedentes de los hornos de fusión.

- Sopladuras

Se agrupan en este tipo todas aquellas porosidades que surgen en el proceso de colada debido a la generación de gas ya sea por la baja permeabilidad del molde de arena o por las reacciones con los moldes.

Se trata de cavidades de mayor tamaño que los poros de gas, con interior liso. Aparecen tanto de forma agrupada como individual en la parte superior de las piezas.

El agua libre presente en el molde también puede crear sopladuras.

En la Figura 5 se muestran ejemplos de las porosidades de gas mencionadas.

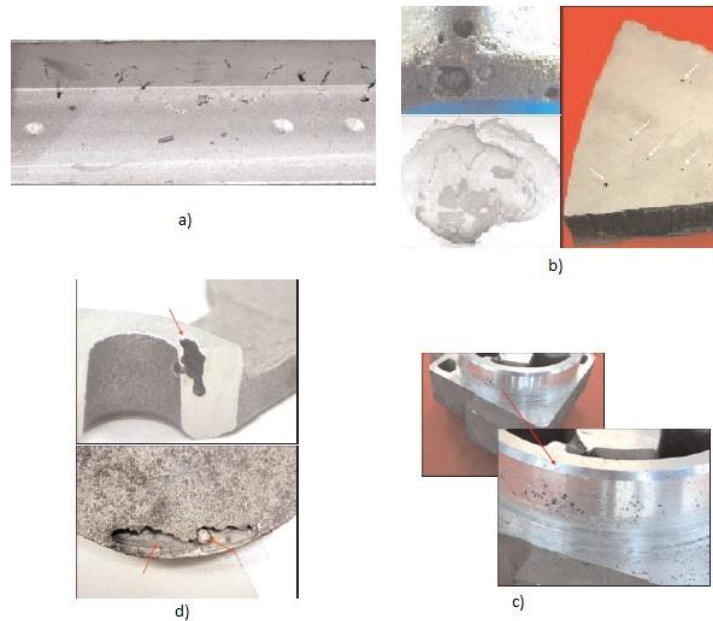


Figura 5: a) fisura de nitrógeno; b) porosidad por oxígeno; c) poros de hidrógeno; d) sopladuras [18].

2.6- ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA ANALIZAR POROSIDAD

Existen múltiples métodos tanto invasivos como no destructivos que permiten analizar la calidad de las piezas tanto externa como internamente.

Dado que este trabajo trata sobre la porosidad, un defecto interno, se van a analizar los ensayos que permiten este tipo de análisis.

Como se ha visto anteriormente es muy interesante conocer la porosidad para evitar fallos o cambios en las propiedades mecánicas no previstos.

El cálculo de la porosidad y de su ubicación en la pieza conlleva un gran esfuerzo pero es importante también para una rentabilidad adecuada de la producción ya que permite analizar las causas que producen la porosidad para evitar al máximo este tipo de defecto.

A continuación se muestran los principales métodos, destructivos y no destructivos, para el análisis de la porosidad en aleaciones de aluminio [26-31].

➤ Ensayos destructivos

Este tipo de ensayos suele realizarse una vez ha fallado la pieza o durante el control de la producción ya que conlleva la destrucción de la pieza y esta deja de ser útil. Aportan datos precisos de la pieza ensayada y proveen de datos útiles para el diseño.

- Metalografía

Consiste en el estudio de las características estructurales y los constituyentes de los metales o aleaciones. Sirve para identificar el metal, comprobar la correcta fabricación de la pieza tanto morfológicamente como su composición, observar daños o degradación de las piezas, etc.

Se puede realizar con microscopio óptico o electrónico, perfilometría, ataques químicos, etc. En la Figura 6 se observa una pieza de aluminio analizada por método metalográfico.

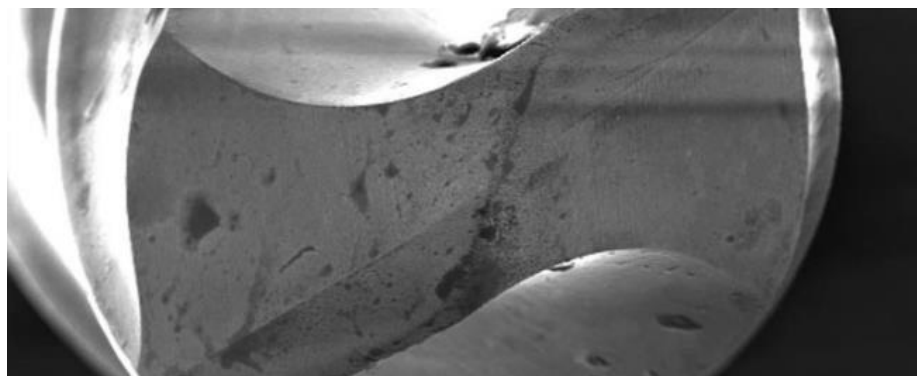


Figura 6: Ensayo metalográfico [26].

➤ Ensayos no destructivos (END)

Con estos métodos es posible analizar el interior de las piezas, aparte de la superficie, sin necesidad de dañarlas, lo que permite su posterior utilización. Esto es de gran importancia ya que los métodos invasivos se pueden ver alterados al cortar la pieza por la región que se quiere analizar. Permiten dar una garantía sobre las piezas fabricadas y así evitar riesgos. Este tipo de ensayos se utilizan para la detección de inclusiones, defectos de moldeo, inspección de soldaduras, porosidad, etc.

- Radiografía

Se emplean rayos X o Gamma para atravesar el material. Estos rayos son absorbidos por una película en mayor o menor medida dependiendo del espesor del material y de las discontinuidades que presente. La pieza absorbe parte de la radiación y el resto es absorbido en la película, es por esto que las zonas de menor espesor presentaran un área más oscura y las porosidades (cavidades), inclusiones o grietas serán zonas completamente negras debido a la ausencia de material en dicha región.

Este tipo de ensayo depende de múltiples variables como son el tiempo de exposición, intensidad de radiación, densidad y espesor del material, distancia fuente-objeto-película, etc.

Es uno de los métodos más utilizados ya que permite caracterizar las discontinuidades y es preciso, pero presenta ciertos inconvenientes como el uso de dispositivos radioactivos, exposiciones largas, limitación en función del espesor y energía necesaria, etc.

En la Figura 7 se muestra el funcionamiento de la radiografía y un ejemplo de análisis mediante este método END.

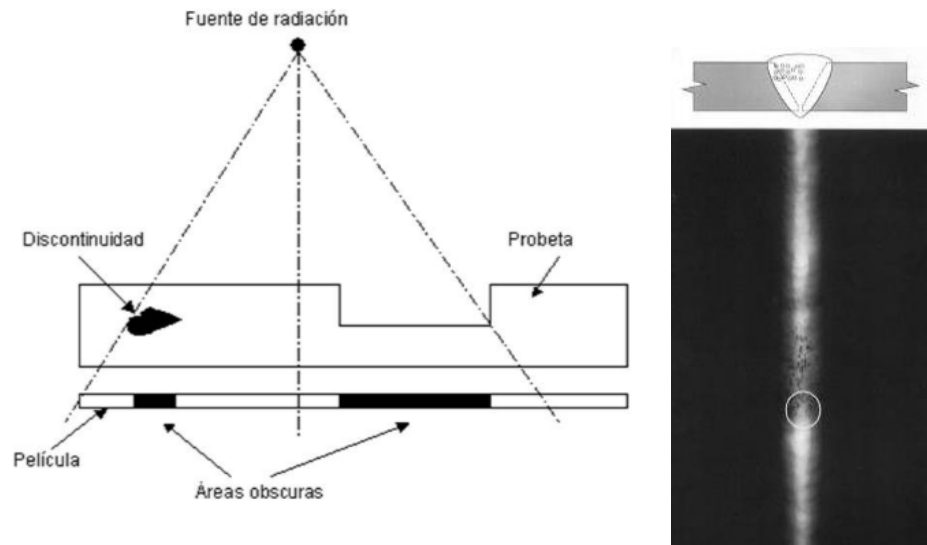


Figura 7: Principio de operación de la radiografía; Porosidad agrupada examinada por método radiográfico [27, 28].

- Ultrasonido

Consiste en el empleo de ondas de alta frecuencia (100kHz a 20MHz) generadas por un cristal y detectadas por un transductor que las transforma en señales eléctricas de forma que son observables en un osciloscopio.

Las ondas se transmiten por el material a inspeccionar y se ven reflejadas al encontrarse con una bolsa de aire (poros) o la cara opuesta del material. De esta forma se producirá una atenuación en el osciloscopio que permite analizar el tamaño y localización del defecto.

Tiene múltiples aplicaciones sobre todo en piezas gruesas y largas, es posible la inspección desde una sola superficie y aporta información de la profundidad de la discontinuidad.

Presenta ciertas limitaciones dado que no detecta discontinuidades del tamaño de grano o menores, discontinuidades paralelas al haz de ondas pueden no ser detectadas, pueden aparecer problemas de sensibilidad en secciones delgadas y hay poca repetitividad en los exámenes.

En la Figura 8 se observa el principio de operación de los equipos ultrasonido.

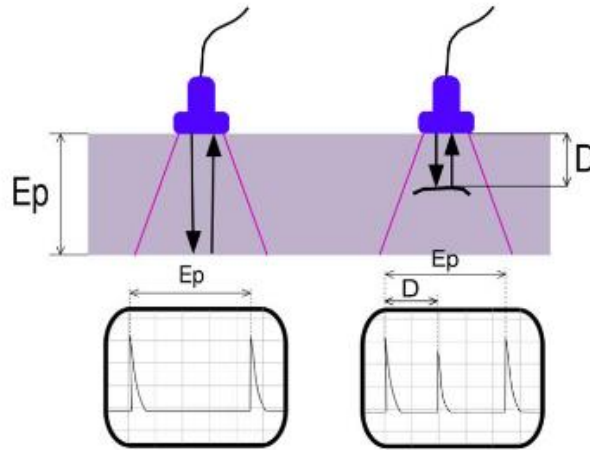


Figura 8: Principio de operación ultrasonido [28].

- Detección de fugas

Existen varios métodos no destructivos para comprobar la hermeticidad de las piezas. Se utiliza cuando la pieza fabricada va a funcionar bajo presión o es necesario evitar fugas.

Algunos de estos métodos para la detección de fugas son los líquidos penetrantes, medición de presión, burbujeo, detección de halógenos, espectro de helio, radioisótopos trazadores, etc.

- Tomografía Computarizada

Al igual que la radiografía utiliza rayos X para obtener una imagen de la pieza ensayada pero en este caso crea una imagen digital en tres dimensiones que permite un análisis más profundo y preciso del conjunto.

Permite medir el área de los poros, su profundidad, densidad del material, etc. Provee más información en comparación con otros métodos pero su precisión no está tan comprobada dado a los múltiples parámetros de los que depende.

Dado que este trabajo trata sobre la Tomografía Computarizada en el próximo capítulo se verá en profundidad.

3. TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA

La Tomografía Computarizada es una prometedora técnica de control de calidad en la industria aplicable a numerosos sectores entre los que se incluyen los ensayos no destructivos de piezas coladas.

Emplea rayos X junto con algoritmos computacionales para obtener información en modo de imágenes de alta calidad. Una de las principales ventajas es que permite obtener una vista tridimensional del objeto analizado mediante la digitalización desde diferentes ángulos, es por eso que permite un análisis más preciso con respecto a las radiografías convencionales (2D).

La información obtenida mediante este método permite acelerar los procesos de fabricación durante la elaboración de prototipos o reducir el número de piezas descartadas en una producción en serie detectando problemas en la fabricación a tiempo. Permite verificar complejas estructuras internas, inspección de zonas concretas dentro del conjunto analizado, medición sin necesidad de seccionar la muestra, medición de espesores, detección y medición de volúmenes internos tales como poros o defectos en el material, etc.

Las mediciones se ven influenciadas por numerosos factores por lo que hay componentes que pueden no ser cuantificados correctamente. Algunos de estos factores son: la ubicación del emisor de rayos X, características del receptor, distancias relativas de la fuente, geometría de la muestra, material y rugosidad de la muestra, procesamiento de imágenes, etc. También hay que tener en cuenta otras variables que pueden repercutir en las mediciones como los efectos de la temperatura o movimiento inesperado de la muestra.

Un Sistema Tomográfico consta de una fuente emisora de rayos X, un sistema móvil, un detector y elementos electrónicos y computacionales para la preparación y obtención de la información.

El principio de operación es el siguiente:

- EL proceso comienza con la emisión de fotones desde el tubo de rayos X. Los fotones son generados cuando electrones con alta energía, acelerados en el cátodo, golpean el ánodo liberando su energía cinética como fotones. Cerca del 99% de la energía se pierde en forma de calor por lo que es necesario un buen sistema de refrigeración para evitar el sobrecalentamiento del tubo de rayos X. En la Figura 9 se observa el funcionamiento de un emisor de rayos X.

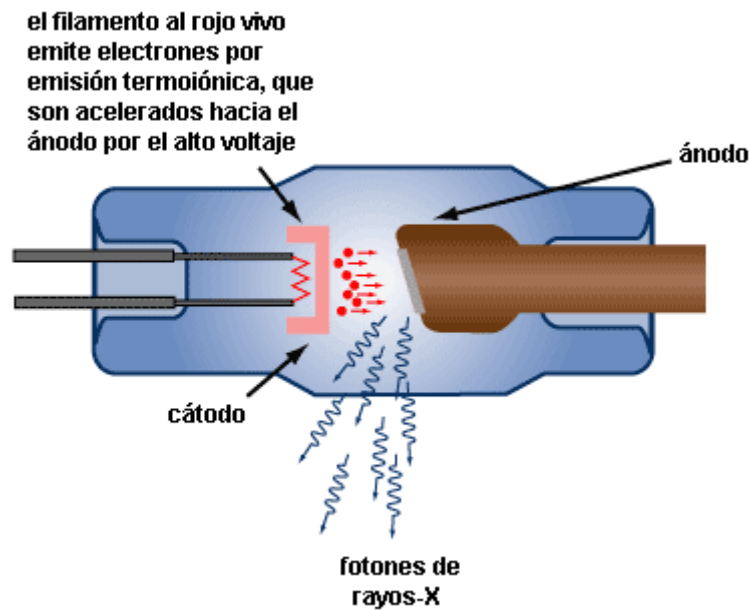


Figura 9: Emisor de rayos X [36].

- Una vez generado el haz de rayos X es dirigido hacia el objeto a analizar.
- En el otro extremo se encuentra un receptor que recibe la señal de los rayos X y produce una imagen del objeto.

Se toman radiografías del objeto desde diferentes ángulos. Como se puede observar en la Figura 10 es el objeto a analizar el que rota.

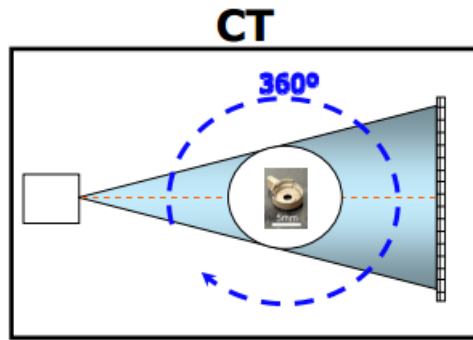


Figura 10: Operación del tomógrafo [33].

- A continuación se crea una imagen virtual del objeto y se procede a la reconstrucción tridimensional mediante algoritmos matemáticos.
- Es posible, después de todo el proceso de digitalización, analizar los datos utilizando software metrológicos para medir las dimensiones de las superficies o comparar con el modelo nominal CAD.

Objetos de gran espesor o alta densidad debilitan el haz de fotones y suponen una imagen más clara, las regiones con menor densidad aparecerán más oscuras.

Tienen una gran aplicación en diferentes campos. Uno de los principales usos, además del análisis no destructivo de muestras en el campo industrial, es en el campo radiológico médico. En el ámbito industrial, al contrario que en la mayoría de los sistemas médicos, la pieza a analizar rota sobre una mesa rotatoria, quedando fijos la fuente de rayos X y los detectores. Para el uso industrial es necesario mayor energía que en el campo médico dado que es más complicado penetrar en materiales de mayor densidad como pueden ser metales o plásticos frente al cuerpo humano, mayormente formado por agua.

En conclusión, la Tomografía Computarizada presenta numerosas ventajas respecto a los métodos tradicionales de medición: permite un análisis simultáneo de calidad dimensional y propiedades del material, inspección no destructiva de geometrías internas y externas, y reconstrucción tridimensional del conjunto en un tiempo relativamente corto. Debido a estas ventajas la Tomografía Computarizada cada vez tiene más importancia en el ámbito industrial y se sigue investigando en la aplicación y mejora de este método no destructivo. En la Figura 11 se observa un ejemplo de análisis de una pieza fundida de aluminio mediante Tomografía Computarizada.

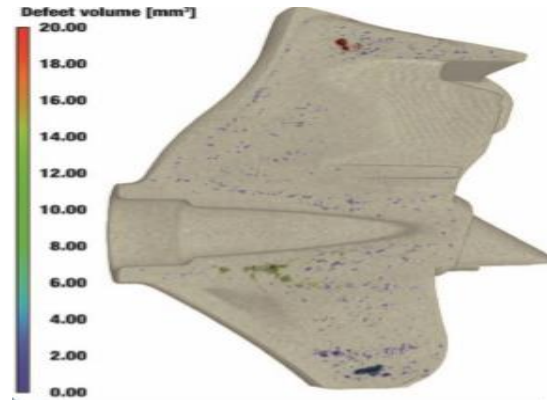


Figura 11: Análisis de porosidad mediante Tomografía Computarizada [32].

4. METODOLOGÍA Y PUESTA A PUNTO

En este apartado se verá el camino seguido para diseñar y preparar las partes de aluminio y su soporte para el tomógrafo así como su montaje.

4.1- MATERIAL UTILIZADO

A continuación se enumeran los medios empleados para la elaboración del proyecto tales como maquinaria, materiales y software.

➤ Ordenador personal (PC)

Se utilizará el ordenador para diferentes tareas:

- Diseño de las piezas de aluminio y soporte de plástico.
- Control de la fabricación de las piezas de aluminio en torno CNC y operaciones de la impresora 3D para las piezas de plástico.
- Reconstrucción 3D de las piezas y medidas de las mismas en tomógrafo computarizado.
- Medidas del microscopio digital y del perfilómetro óptico.

➤ Torno CNC

Se va a utilizar un torno CNC “PINACHO S90” [41] para fabricar las piezas de aluminio base del estudio.

➤ Impresora 3D

Se emplea la impresora 3D disponible en el laboratorio, “UP! 3D Plus 2” [50], para la elaboración de las piezas de plástico que componen el soporte de las piezas de aluminio para el tomógrafo (Figura 12).



Figura 12: Impresora 3D.

➤ Durómetro

Máquina de pruebas para ensayo de dureza de Vickers. Se emplea para la realización de los diferentes microagujeros en la superficie del aluminio que serán base de estudio. Se emplea la máquina “FV-700” de “FUTURE-TECH” [46] que se muestra en la Figura 13.



Figura 13: Durómetro.

➤ Perfilómetro óptico

Esta máquina se emplea para la inspección y medición de superficies. En este caso se medirán los microagujeros realizados en las probetas de aluminio para que sirvan de referencia al comparar con los que se obtengan mediante Tomografía Computarizada.

Se emplea un Perfilómetro “WYKO NT1100” [43], que se muestra en la Figura 14.

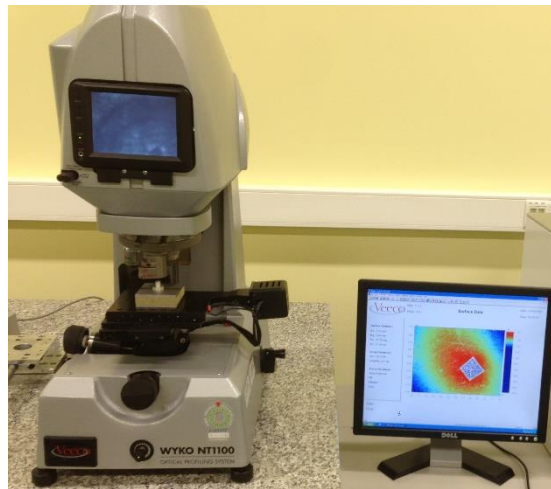


Figura 14: Perfilómetro.

➤ Microscopio Digital

Se empleara para poder obtener una imagen ampliada de los microagujeros y poder medirlos de forma que se disponga de datos de referencia para comparar con el tomógrafo. Se obtienen imágenes en 2D por lo que no es posible analizar la profundidad de los poros, cosa que no ocurre con el Perfilómetro Óptico.

En este proyecto se va a emplear un microscopio “Baty Vision System-Venture Touch” [45] que se presenta en la Figura 15.

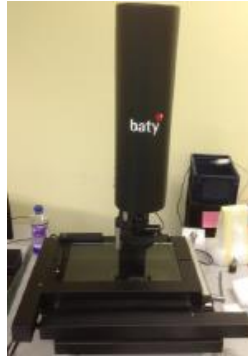


Figura 15: Microscopio Digital.

➤ Tomógrafo Computarizado

Esta máquina es la base de este proyecto. Realiza radiografías a las probetas de aluminio para su posterior reconstrucción 3D.

En este caso se emplea un tomógrafo “Phoenix v/tome/x s” de “GE Oil & Gas” [37], que es el que se muestra a continuación en la Figura 16.

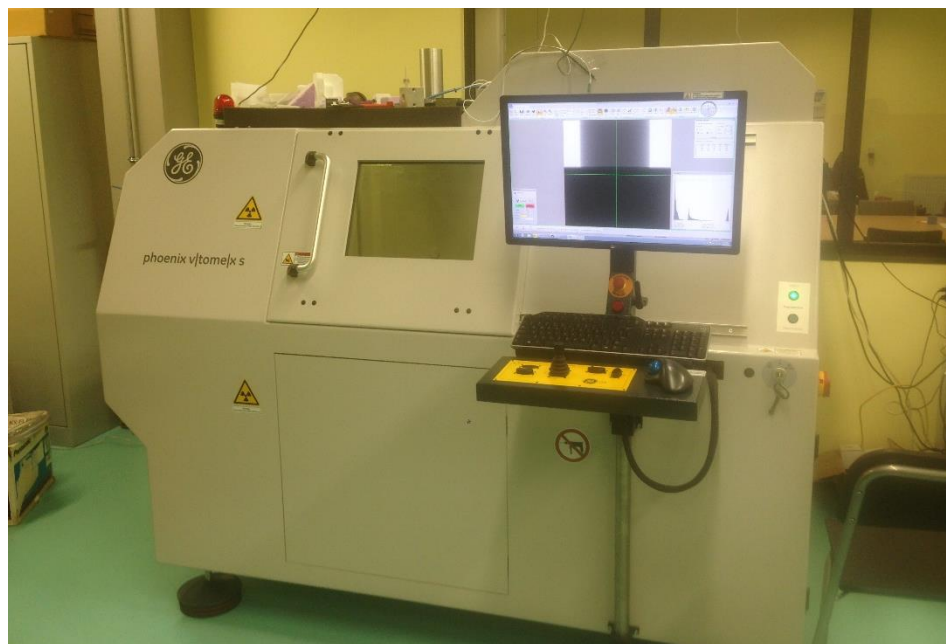


Figura 16: Tomógrafo empleado.

➤ SolidWorks 2013

Se trata de un programa de Diseño Asistido por Ordenador (CAD) con el que se realiza el diseño de las piezas de aluminio así como de las de plástico y su montaje para crear el soporte.

➤ Catia V5

Se ha empleado este programa para crear el programa CNC encargado de la fabricación de las piezas de aluminio.

➤ Software TC (Tomografía Computarizada)

Se trata del “VG Studio 2.2” de la compañía “GE Measurement & Control”. Este software incluido en la maquinaria empleada para realizar las medidas mediante Tomografía Computarizada es el encargado de realizar una reconstrucción 3D a partir de las imágenes en 2D que toma de la pieza mientras esta rota. También dispone de herramientas de medida que se emplearan para la medida de los poros.

➤ Software del Perfilómetro Óptico

Este programa permite analizar la superficie de las piezas de aluminio de forma que se obtenga información de la morfología de la superficie.

➤ Cura 15.04.3

Este programa se emplea para la preparación de la impresión 3D. Se importa el archivo CAD del diseño y se configuran diferentes parámetros para obtener el “G-Code” adecuado y enviarlo a la impresora 3D.

Se pueden modificar múltiples variables como la densidad de llenado, velocidad, temperatura, soporte, flujo de filamento, refrigeración, etc.

➤ Mountains Premium

Este programa se utiliza para realizar las medidas de la superficie de aluminio a partir de los archivos recogidos por método topográfico, en este caso medirá los microagujeros a partir de la información obtenida por el perfilómetro óptico.

4.2- DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LAS PIEZAS DE ALUMINIO

La realización de este trabajo conlleva el análisis de la porosidad en aleaciones de aluminio mediante el uso de la Tomografía Computarizada. Es por ello que se van a fabricar diferentes piezas de aluminio para poder contrastar los resultados y dar validez a este método de medición de defectos.

Se va a trabajar con una aleación de aluminio A 390.0, ISO Al Si17 Cu4 Mg, con tratamiento térmico T6 [5,38,39]. El principal aleante es el silicio ya que se trata de una aleación de la serie 3. Esta aleación presenta muy buenas propiedades mecánicas como resistencia y ductilidad, bajo coeficiente de expansión térmico, resistente a altas temperaturas, buena fluidez, etc. Tiene múltiples aplicaciones en el ámbito automovilístico como bloques motor, zapatas de freno, compresores, bombas, poleas, etc.

Son múltiples las posibilidades a la hora de diseñar las piezas de aluminio pero por simplicidad se escogerá una forma cilíndrica, ya que su mecanizado es sencillo mediante el torno CNC.

Para variar la resolución de las imágenes y estudiar las diferentes variables que rodean a la Tomografía, tales como la potencia e intensidad de la radiación, se realizaran diferentes piezas para ser analizadas cuyos diámetros menores variarán de 4mm a 7mm. En todos los casos el diámetro mayor será de 16mm para asegurar la posición en el soporte que se diseñará. La altura de las muestras de aluminio también será constante (12mm) de forma que el soporte que se diseñe sea válido para todas las muestras.

Para elaborar las piezas metálicas se parte de un cilindro de aluminio de 20mm de diámetro y 100mm de largo. Para obtener las dimensiones requeridas se realizan las siguientes operaciones en el torno CNC [41]:

- Refrentado: Esta primera operación se realiza para asegurar una superficie plana en el extremo, perpendicular al eje de giro.
- Cilindrado: Operaciones de desbaste y acabado, paralelo al eje de giro, hasta obtener las dimensiones requeridas en las diferentes secciones.
- Tronzado: Se corta la pieza ya mecanizada del resto del cilindro.

Dado que este trabajo consiste en analizar los agujeros presentes en las piezas de aluminio estos se van a realizar de forma artificial mediante el durómetro de Vickers [46]. Se van a realizar nueve microagujeros en la superficie de la pieza de aluminio de la siguiente forma:

- Tres microagujeros serán creados aplicando una fuerza de 20kgf, alineados y separados uno de otro 1mm.
- Tres microagujeros serán creados aplicando una fuerza de 10kgf, alineados y separados uno de otro 1mm.
- Tres microagujeros serán creados aplicando una fuerza de 5kgf, alineados y separados uno de otro 1mm.

Conociendo el procedimiento del ensayo de dureza Vickers [40], en el que se emplea una pirámide de diamante con base cuadrada y ángulo en el vértice de 136°, se puede calcular de forma teórica aproximada las dimensiones que tendrán los microagujeros.

Para ello es necesario conocer la fuerza que se va a emplear para realizarlos y la dureza de la aleación A390.0-T6.

La dureza Vickers se calcula dividiendo la fuerza entre la superficie dejada sobre la superficie (Kp/mm^2). Las expresiones simplificadas del cálculo de la dureza Vickers en función de la diagonal (media entre las dos diagonales del polígono que forma), y en función de la profundidad de penetración son las siguientes:

$$HV = \frac{1.854 * F}{D^2}$$

$$HV = \frac{F}{4 * H^2 * \tan\left(\frac{136}{2}\right) * \sqrt{1 + \tan^2\left(\frac{136}{2}\right)}}$$

Despejando estas ecuaciones conociendo la fuerza ejercida por el durómetro para cada microagujero grande, mediano y pequeño (20kgf, 10kgf y 5kgf respectivamente) y buscando en tablas la dureza de la aleación 390.0-T6 (aproximadamente 140 HV) se puede calcular los diámetros y profundidad de los poros como se muestra en la Tabla 2:

PORO	DIAGONAL TEÓRICA (mm)	PROFUNDIDAD TEÓRICA (mm)
GRANDE	0,514642733	0,07352135
MEDIANO	0,363907367	0,051987445
PEQUEÑO	0,257321367	0,036760675

Tabla 2: Cálculo teórico de las dimensiones de los poros.

La superficie de las piezas debe ser lo más plana posible de forma que encajen a la perfección. Durante la elaboración de los microagujeros se crean crestas alrededor de estos. Para eliminar las crestas se realiza una operación de planeado mediante rectificado frontal. Para el rectificado se preparan las piezas embutiéndolas en resina (Figura 17).



Figura 17: Preparación de piezas de aluminio para operación de aplanado.

Se necesitarán dos piezas idénticas que se dispondrán simétricamente tapando los agujeros realizados de forma que simulen una única pieza y los agujeros puedan ser estudiados como poros. Solo será necesario realizar los agujeros en una de las piezas. Para facilitar el acoplamiento de las dos piezas se crea el soporte del que se hablará posteriormente. En la Figura 18 se muestran las piezas de aluminio así como su posicionamiento y la localización de los microagujeros.

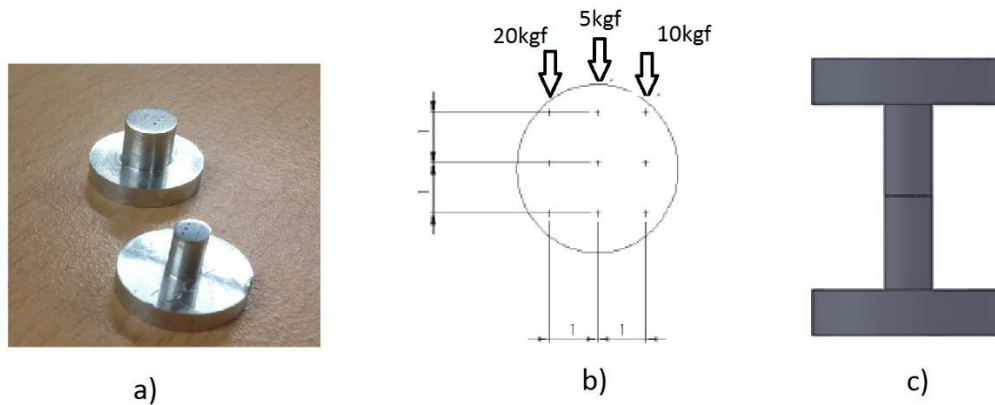


Figura 18: a) Piezas con agujeros; b) Posición de los microagujeros; c) Posicionamiento de las dos piezas de aluminio.

4.3- DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL SOPORTE

Se va a diseñar y posteriormente fabricar un soporte para la máquina tomográfica que permita sostener las dos piezas de aluminio aplicando cierta presión en sus caras de contacto, una de las cuales presenta los microagujeros, para poder simular una lectura de la porosidad de un material sólido sin necesidad de cortarlo.

Este soporte necesita cumplir ciertos requisitos:

- Mantener las piezas de aluminio concéntricas y estáticas con cierta presión para poder simular que se trata de un único sólido, evitando los espacios entre las caras de contacto, y permitir un análisis óptimo.
- Posicionamiento del soporte en el tomógrafo de forma que se eviten movimientos indeseados que podrían dañar la precisión de las mediciones. El soporte del tomógrafo girara durante la toma de imágenes para la posterior reconstrucción por tanto es necesario que el soporte este correctamente sujeto a la máquina.

Para realizar el diseño se va a utilizar SolidWorks, software que permite definir la pieza con las dimensiones deseadas. Los componentes del soporte se van a fabricar únicamente en plástico dado el equipo del que se dispone en el laboratorio, ya que la elaboración del soporte en metal requeriría la subcontratación de la fabricación.

Las piezas serán fabricadas en la impresora 3D “UP Plus 2” tras preparar las operaciones del proceso con el software “Cura”.

4.3.1- ALTERNATIVAS DE DISEÑO

En primer lugar se crean y estudian diferentes modelos que cumplan los requisitos descritos anteriormente y que tengan en cuenta las dimensiones de las piezas de aluminio.

- En primer lugar se plantea situar las piezas metálicas sobre dos placas unidas mediante cuatro varillas que fijarían la distancia entre estas como se muestra en la Figura 19.

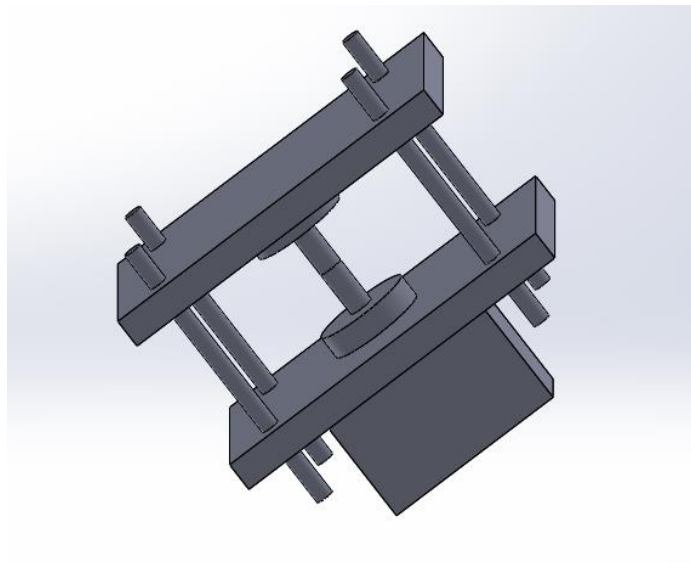


Figura 19: Diseño soporte alternativo 1.

Se pueden apreciar varios inconvenientes si se diseñara este soporte. No se asegura la correcta alineación de las piezas metálicas, la presión que se ejerce sobre el sistema puede no estar repartida uniformemente sobre la superficie del cilindro de aluminio ya que depende de las cuatro varillas y por tanto sería difícil asegurar el paralelismo entre las placas.

- El siguiente modelo que se plantea es más simple al tratarse de cilindros. Consiste en dos bases cilíndricas de plástico que se mantienen paralelas mediante dos tornillos y que encierran en su interior las piezas de aluminio como se muestra a continuación en la Figura 20.

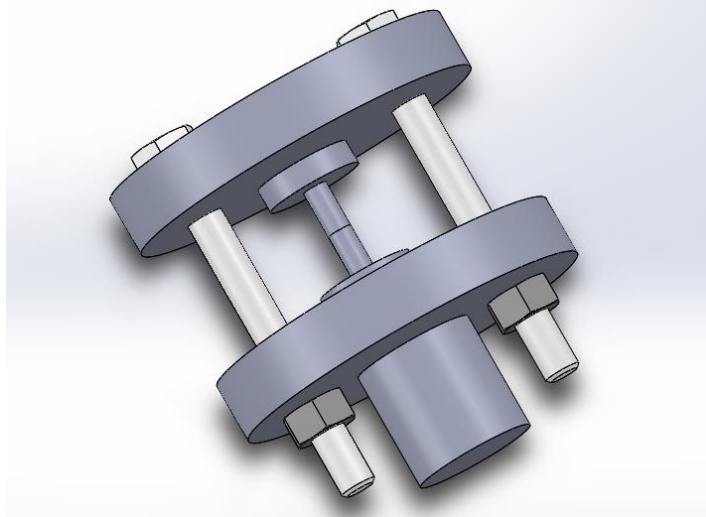


Figura 20: Diseño soporte alternativo 2.

En este diseño se plantean fallos similares a los descritos en el modelo anterior. Al ejercer presión mediante dos tornillos no se asegura el paralelismo entre las bases y tampoco se puede confirmar el correcto posicionamiento de las piezas metálicas.

- Este modelo consigue solucionar el paralelismo de las bases que ejercen presión sobre las muestras de aluminio al encontrarse en el interior de un tubo de plástico. Se puede asegurar una presión uniforme sobre las piezas metálicas para obtener una correcta unión que permita realizar el análisis simulando un único objeto sólido. Un tornillo ejerce dicha presión sobre el sistema. Hay 4 toques en los extremos del tubo de plástico para poder realizar la presión evitando el movimiento de las piezas. Se puede ver este modelo en la Figura 21.

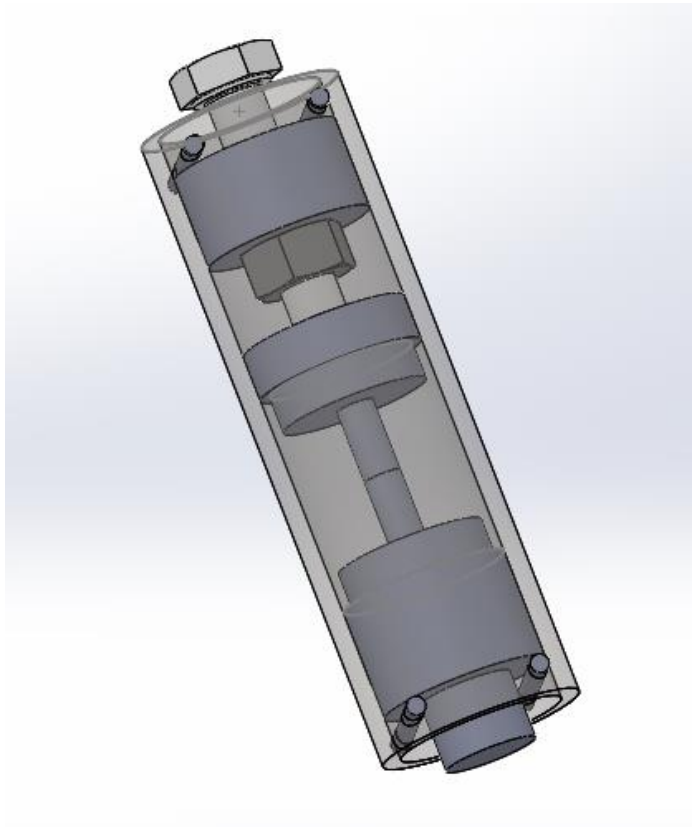


Figura 21: Diseño soporte alternativo 3.

Se sigue teniendo un inconveniente en el diseño, no se puede asegurar el correcto posicionamiento de las piezas metálicas ya que presenta un diámetro inferior al del tubo de plástico.

➤ **Modelo definitivo:**

Al modelo del soporte anterior se le realizan ciertas modificaciones para obtener el soporte final. En primer lugar se van a realizar unos agujeros en las piezas de plástico que limitan con las muestras de aluminio para que estas encajen y así obtener un correcto posicionamiento. También se van a realizar dos agujeros pasante en la base y en la cubierta del otro extremo para anclar dichas partes al tubo de plástico y obtener una mejor fijación del sistema. Se realizará un agujero hexagonal en el que introducir la tuerca para garantizar que el tornillo se introduce en línea recta y ejerce presión de forma homogénea en el sistema. Se muestra el modelo definitivo en la Figura 22.

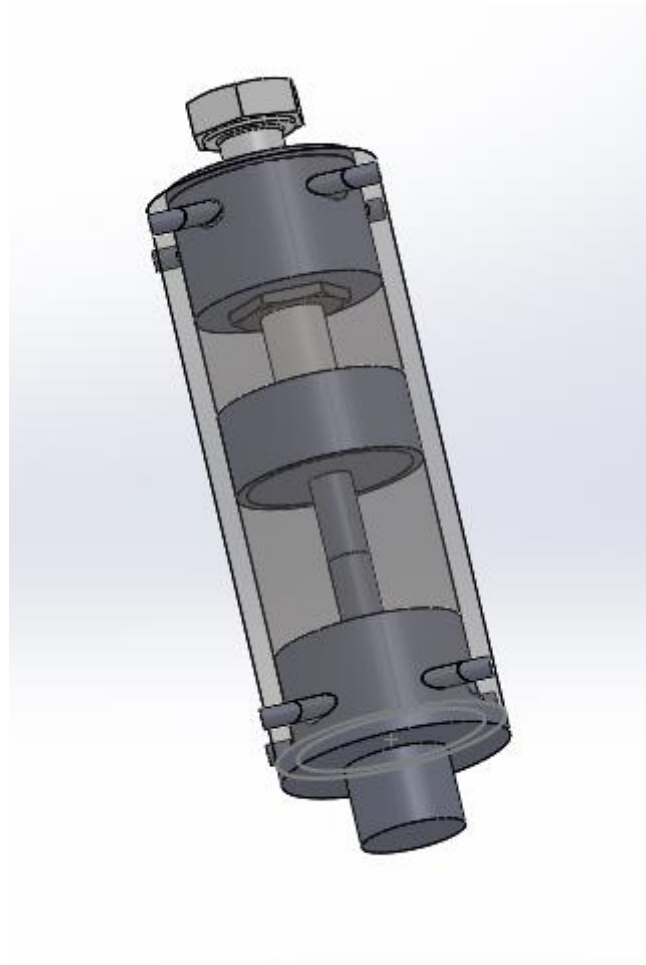


Figura 22: Soporte definitivo.

4.3.2- DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SOPORTE

- Tubo de plástico:

Este elemento es clave para este soporte. Consiste en un tubo dentro del cual se introducirán todos los componentes (piezas de aluminio, cubiertas, etc.) y es el encargado de asegurar un correcto posicionamiento además de permitir que se ejerza presión con el tornillo al sistema (Figura 23). Es posible realizar presión ya que el tubo dispone de unos agujeros en los extremos superior e inferior que se unirán a las piezas de plástico correspondientes, base y cubierta tuerca, para evitar el movimiento entre estas y permitir que al apretar el tornillo este ejerza presión sobre las piezas de aluminio.

El tubo de plástico mide 55mm de longitud y tiene un diámetro interior de 18mm para encajar con las piezas de plástico que irán en su interior. Las paredes presentan un espesor de 2mm.

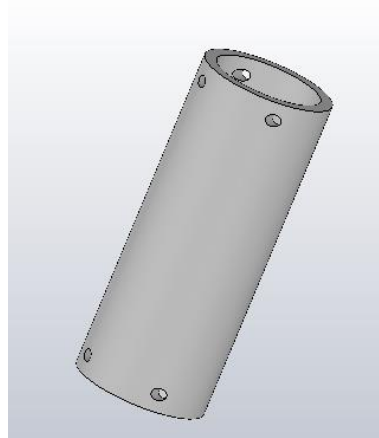


Figura 23: Tubo de plástico.

- Base:

Sirve de unión entre el soporte y la máquina mediante un cilindro de 10mm de diámetro. Consta de dos agujeros pasantes (2.5mm de diámetro) por los que se introducirán los clavos para fijar la base al tubo de plástico, con lo que se logra un correcto posicionamiento y sistema de presión. Es esencial para la correcta disposición de la pieza de aluminio inferior ya que esta se introduce parcialmente sobre la base.

El diámetro interior en el que se alojará una de las piezas metálicas es de 16mm para que encaje correctamente. Las dimensiones mayores en las que se apoyará el tubo de plástico encajan con las dimensiones de este (18mm y 22mm de diámetro respectivamente). La longitud de la base es de 19,5mm.

En la Figura 24 se observa la forma que tomará la base.

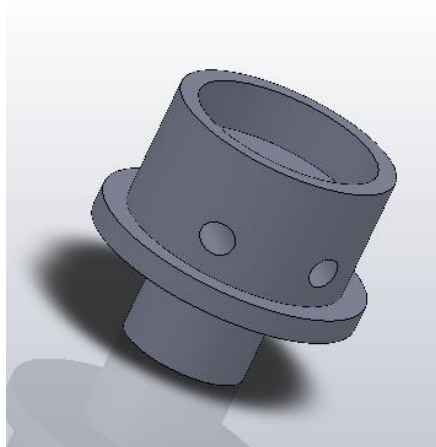


Figura 24: Base del soporte.

- Cubierta superior:

Esta pieza se encarga de proteger la pieza de aluminio de la presión ejercida por el tornillo aparte de asegurar una correcta disposición de la pieza superior de aluminio en el soporte ya que esta se encuentra parcialmente incrustada en la cubierta. Las dimensiones de la cubierta superior se corresponden con las del interior del tubo de plástico en el que se alojará (18mm) y el interior se corresponde con las de la pieza metálica (16mm). La altura de la cubierta superior es de 8mm. Se muestra un modelo de la cubierta superior en la Figura 25.

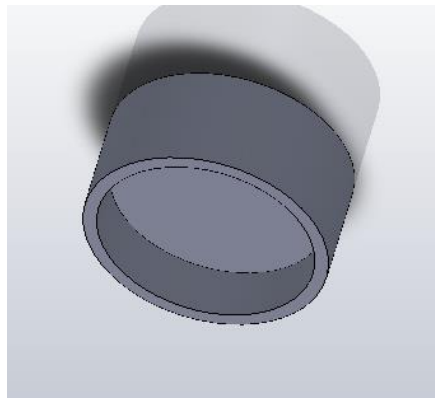


Figura 25: Cubierta superior del soporte.

- Cubierta tuerca:

Para conseguir la correcta presión entre las dos piezas de aluminio, y evitar espacios libres entre ellas, es necesario que el tornillo ejerza presión sobre el sistema. Para ello se dispone de esta cubierta (Figura 26), del mismo diámetro que el interior del tubo de plástico, que estará fijada mediante clavos a este y dispone en su base un agujero hexagonal en el que se introducirá una tuerca (M6) para poder apretar el tornillo (M6) y que ejerza presión. La altura de la cubierta tuerca es de 12,5mm.

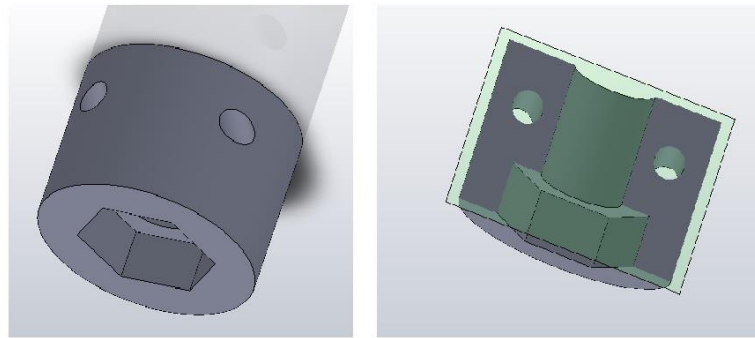


Figura 26: Cubierta tuerca del soporte.

A continuación se muestra en la Figura 27 como quedaría el montaje del conjunto de las piezas del soporte con las piezas de aluminio en su interior. Los planos de todas las piezas que componen el soporte pueden encontrarse en el Anexo A.

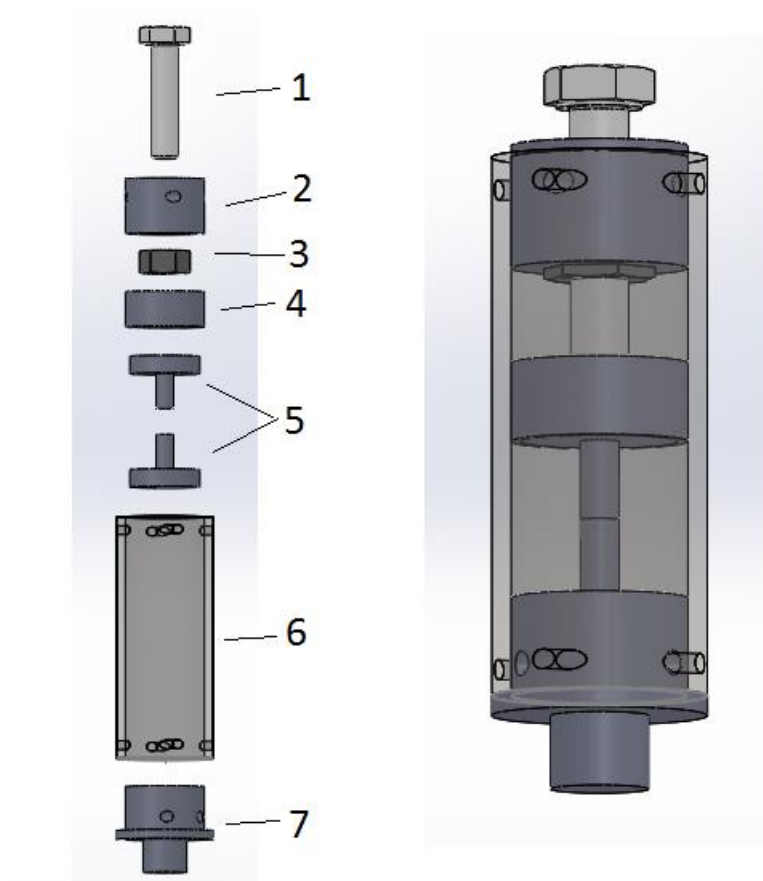


Figura 27: Explosionado y conjunto soporte: 1) Tornillo; 2) Cubierta tuerca; 3) Tuerca; 4) Cubierta superior; 5) Piezas metálicas; 6) Tubo de plástico; 7) Base.

4.3.3- IMPRESIÓN DE LAS PIEZAS

Todas las piezas que componen el soporte serán fabricadas con la impresora 3D a excepción del tubo de plástico, los clavos de unión y el tornillo.

➤ Configuración

En primer lugar se exporta el archivo de diseño en formato .STL al software “Cura”.

Para realizar una correcta impresión de las piezas es necesario controlar ciertos parámetros tales como la temperatura de extrusión, el porcentaje de material sólido, el espesor, la temperatura de la base, sistemas de refrigeración, etc.

Una vez hecho esto es posible obtener el “G-Code” que se enviará a la impresora y se podrá comenzar la impresión.

Es posible imprimir todas las piezas a la vez disponiéndolas en la base en la posición que se desea. Otro factor muy importante a tener en cuenta es la orientación (boca arriba o boca abajo) en la que se imprimirán las piezas ya que al disponer las piezas de agujeros en su interior la impresión puede ser más complicada y conseguir un peor acabado, para superar dichos agujeros el software crea unas capas de material que pueden ser removidas posteriormente para poder imprimir sobre ellas posteriormente. En la Figura 28 se puede observar la importancia de dicha orientación.



Figura 28: Impresión de cubierta superior: boca abajo (izquierda) y boca arriba (derecha).

➤ Impresión de las piezas

Antes de comenzar con la impresión es necesario limpiar la base en la que se imprimirán las piezas con alcohol. Posteriormente se cubre la base con capa de laca para favorecer el agarre y asegurar que las piezas no se desprenderán ni moverán durante el proceso de impresión.

Cuando la impresión ha finalizado, tras esperar que se enfríen las piezas, estas se retiran de la base con ayuda de una paleta. En la Figura 29 se puede ver una de las piezas (base) sobre el soporte de la impresora.

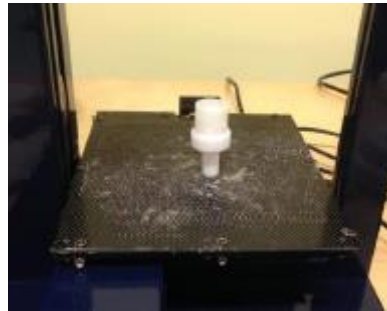


Figura 29: Impresión finalizada de la base.

Dado que en el proceso de impresión influyen muchas variables como se ha visto anteriormente y por causa de diferentes fallos, se obtienen ciertas piezas defectuosas por lo que es necesario repetir la impresión en dichas piezas. A continuación en la Figura 30 se muestran algunas piezas defectuosas.

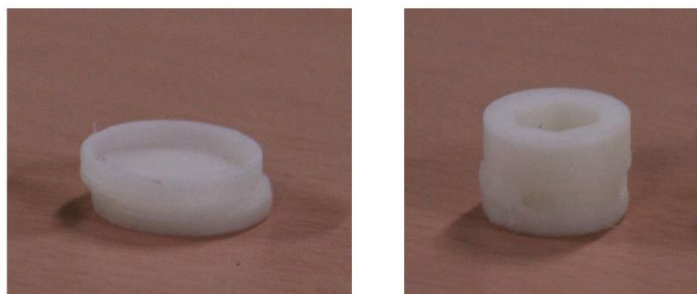


Figura 30: Piezas defectuosas: Cubierta superior (izquierda), cubierta tuerca (derecha).

Las piezas correctamente impresas se pueden observar en la Figura 31 a continuación.



Figura 31: Piezas impresas: Cubierta superior, cubierta tuerca y base.

4.3.4- CONSTRUCCIÓN DEL SOPORTE

Una vez se tienen impresas todas las piezas de plástico y están preparadas las probetas de aluminio se puede comenzar con el montaje del soporte.

En primer lugar es necesario preparar el tubo de plástico para obtener las dimensiones deseadas. Para ello se parte de un tubo de plástico comprado con los diámetros deseados, 18mm de diámetro interno y 22mm de diámetro externo. Se corta el tubo para obtener 55mm de longitud.

Las piezas necesarias para el montaje son las siguientes, en orden de disposición comenzando por la base:

1. Base: Pieza que servirá de unión entre el soporte y el tomógrafo.
2. Tubo de plástico: Se coloca sobre la base y se une a esta mediante unos clavos que atraviesan las dos piezas por los agujeros diseñados para tal fin. Sirve para asegurar que todas las piezas dispuestas en su interior sean concéntricas.
3. Piezas de aluminio: En primer lugar se coloca la pieza con los microagujeros sobre la base y encima de esta se sitúa la otra pieza de aluminio de forma simétrica, como se ha explicado anteriormente para simular un sólido continuo.
4. Cubierta superior: Se coloca sobre la segunda pieza de aluminio de forma que asegura su correcto posicionamiento además de aportar protección a la pieza de aluminio de la presión ejercida por el tornillo.
5. Cubierta tuerca: En la base de esta pieza se coloca una tuerca que permitirá apretar el tornillo para ejercer presión. Para un correcto funcionamiento de este

sistema de presión se necesita anclar la cubierta tuerca al tubo de plástico mediante dos clavos, al igual que en la base. El tornillo atraviesa esta pieza.

En las Figuras 32 y 33 se pueden ver las piezas que componen el soporte así como su ensamblaje:



Figura 32: Piezas del soporte.



Figura 33: Ensamblaje final.

4.3.5- PRESUPUESTO

En este apartado se presentan los costes del proyecto, que incluye el coste del plástico para la impresora 3D, el tubo de plástico exterior, las piezas metálicas y los elementos de presión, además del coste de mano de obra.

Piezas para ensayo:

- Tubo de plástico: 1,25€. Necesario comprar un metro dado el formato del proveedor.
- Piezas de aluminio: 2 piezas de 12mm de longitud. 0,026€/pieza. Total 0,052€
- Tornillo M6: 0,30€
- Tuerca M6: 0,21€

- PLA para impresora 3D: 0.198€ para todas las piezas de plástico impresas. En la tabla 3 se muestran los cálculos del coste del PLA.

Sección hilo	2,85 mm
Longitud hilo	1,24 m

Densidad PLA	1,25 g/cm ³
Precio PLA	20€/kg

Volumen hilo	7,91 cm ³
--------------	----------------------

Precio total piezas	0,19776 €
---------------------	-----------

Tabla 3: Precio PLA.

Costes relacionados con el útil:

- Coste embutir las piezas para el rectificado: 1€
- Costes horarios y ocupación:
 - Impresora 3D (25€/hora; 3 horas), Total 75€;
 - Torno (20€/hora; 1 hora), Total 20€;
 - Rectificadora (18€/hora, 45 minutos), Total 13,5€;
 - Durómetro (20€/hora, 1 hora), Total 20€.
- Mano de obra: 20€/h. 30 horas de diseño, fabricación y montaje. Precio total de mano de obra 600€.

Presupuesto total de elaboración del proyecto 731,51€.

Se puede observar que el coste de la producción del soporte y las muestras es bastante pequeño en comparación con el importe de la mano de obra dado que se necesitan muchas horas de diseño y preparación. No se han tenido en cuenta los costes indirectos.

4.4.- VERIFICACIÓN DE LA POROSIDAD DE LAS PROBETAS MEDIANTE MÉTODOS CONVENCIONALES – TOPOGRAFÍA

En este apartado se van a realizar mediciones de los microagujeros realizados en las piezas de aluminio con el fin de poder emplearlas como referencia para validar la Tomografía Computarizada.

Se van a emplear dos métodos de medición, en primer lugar se empleara un Perfilómetro Óptico que permite tomar las dimensiones de los microagujeros incluido la profundidad. Posteriormente se medirán mediante un Microscopio Digital aunque en este caso la profundidad no es posible calcularla pero sirve para comprobar que el resto de dimensiones son correctas.

4.4.1.- PERFILÓMETRO ÓPTICO

El perfilómetro óptico es un equipo que realiza mediciones de los cambios de altura en una superficie en un registro continuo [42]. Permite conocer el desnivel que aparece en la superficie con respecto a una referencia horizontal con gran precisión.

La pieza de aluminio con los microagujeros se coloca verticalmente de forma que la máquina puede realizar una sucesión de imágenes que permitirá hacer una reconstrucción 3D de la superficie.

Las condiciones medioambientales afectan a las mediciones, principalmente la temperatura. Se puede ver afectada tanto la precisión como la repetitividad de las mediciones por lo que es importante controlar estas variables durante las mediciones [42].

El perfilómetro empleado para obtener estas mediciones es el “WYKO NT1100” (Figura 34) [43]. Este equipo emplea interferometría de luz blanca para medir con gran precisión la superficie, toma medidas desde 10^{-7} mm hasta milímetros para las discontinuidades de mayor tamaño.

La máquina cuenta también con una pantalla que se empleará para localizar el área de interés de nuestras probetas donde se localizan los microagujeros.

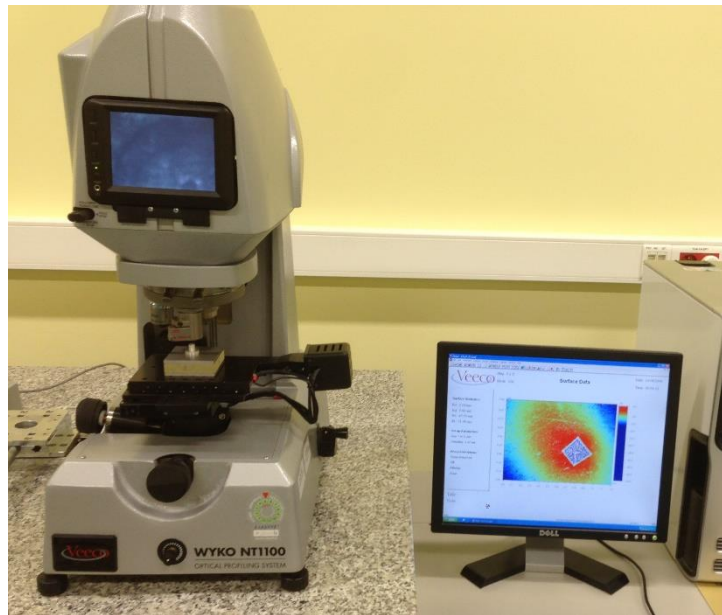


Figura 34: Perfilómetro Óptico.

Una vez se ha escaneado la superficie se importa al programa “Mountains Premium”. Con este programa es posible realizar la reconstrucción 3D (Figuras 35,36) y medir todas las dimensiones de los microagujeros.

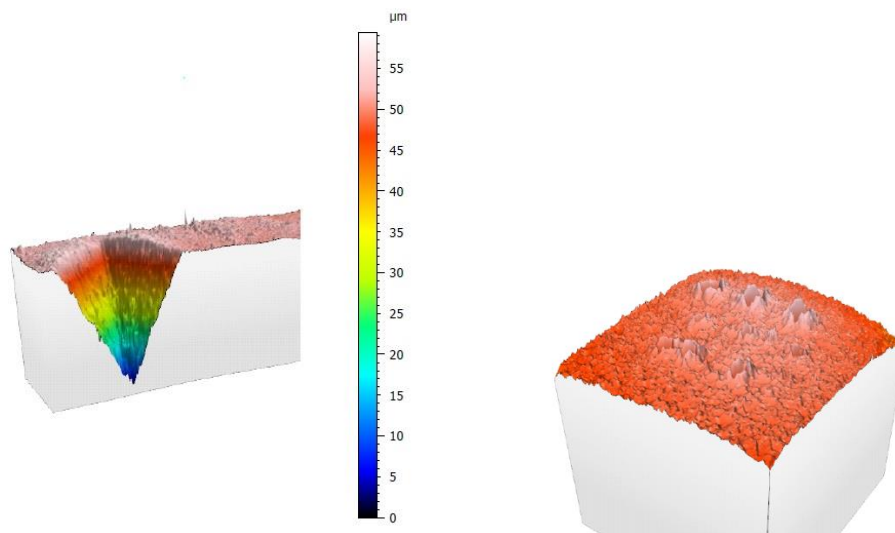


Figura 35: Sección de microagujeros 3D.

Figura 36: Reconstrucción 3D área de interés.

En la reconstrucción 3D se pueden apreciar unas elevaciones alrededor de los agujeros, estas han sido provocadas durante la elaboración de los agujeros con el durómetro.

En la sección transversal (Figura 35) se puede ver la morfología del poro así como la profundidad que se puede cuantificar gracias a la escala de colores.

Una vez obtenida toda la información en el programa se puede comenzar a tomar medidas. A continuación se va a analizar el procedimiento de medición de uno de los poros. Dado que el proceso es el mismo para todos los microagujeros sólo se explicará el proceso de uno de ellos (G3), el análisis completo puede encontrarse en el Anexo B.

1. Área de interés:

En primer lugar es necesario seleccionar el área que se desea analizar, uno de los microagujeros. El área que se va a extraer debe ser mayor a los límites del poro para evitar errores en las mediciones producidos por las elevaciones que se crearon al hacer los microagujeros. En la figura 37 se ve el proceso de operación.

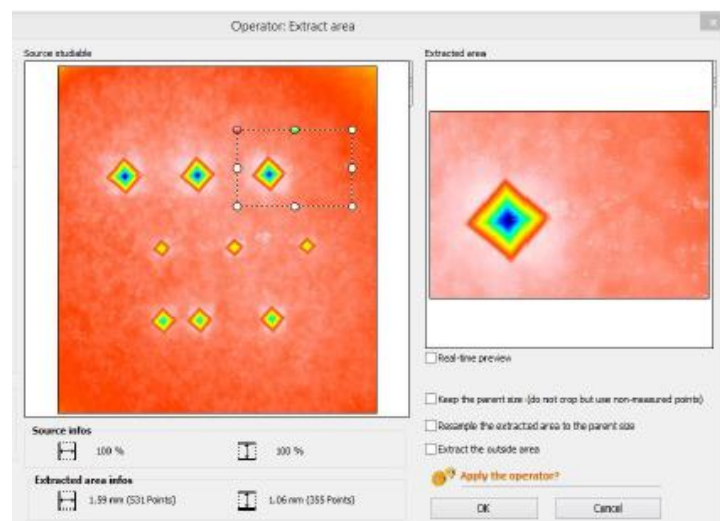


Figura 37: Área extraída del conjunto.

2. Morfología de la sección:

Se procede a tomar las primeras medidas. Se van a medir las diagonales del polígono que forma. Para el microagujero que se está analizando se obtienen los siguientes valores de las diagonales; $A=0.475$, $B=0.478$. En la Figura 38 se observa la medición de las diagonales del poro analizado (G3).

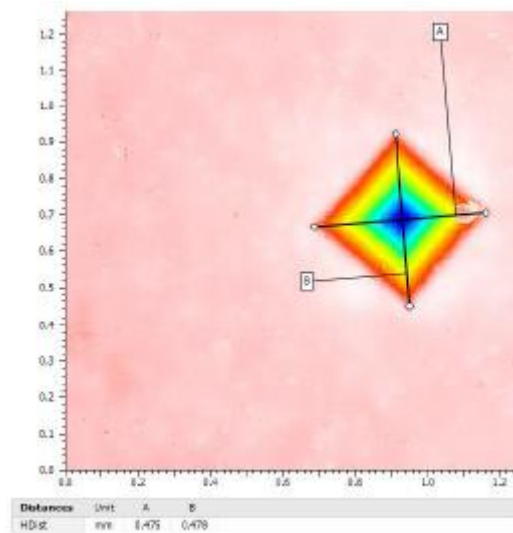


Figura 38: Medida de diagonales de un poro.

3. Medición de la profundidad:

Para medir la profundidad es necesario extraer un perfil. Para obtener la mayor profundidad del agujero se va a seleccionar una sección transversal del poro que pase por el centro de este, Figura 39. Al igual que en el paso anterior interesa seleccionar un área lejana al agujero para evitar errores de medición de las montañas.

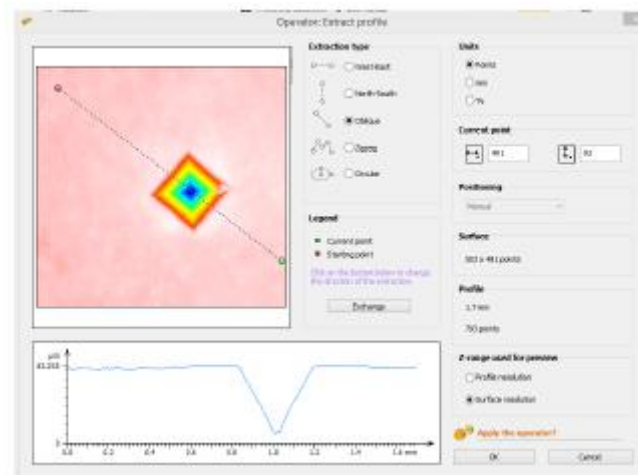


Figura 39: Extracción del perfil.

Mediante el empleo de la herramienta “nivelar” que proporciona el programa es posible mejorar las mediciones al nivelar la superficie seleccionada, el programa ajusta la inclinación de la imagen sin tener en cuenta los cambios bruscos de altura de la superficie.

Con la herramienta “medida de altura” se puede obtener información de la profundidad del perfil seleccionado. Esta herramienta realiza automáticamente la medición pero para mayor precisión se emplea el método manual en el cual se puede seleccionar las regiones que se toman como referencia. Esta herramienta es muy útil en este caso debido a la presencia de las montañas en los alrededores del poro y la rugosidad del material que crea pequeños picos en la superficie, por lo que no siempre es fácil calcular el punto más profundo. La altura de referencia para la medición se seleccionará por tanto alejada de las montañas. En la Figura 40 se observa la medición de la profundidad como se ha descrito.

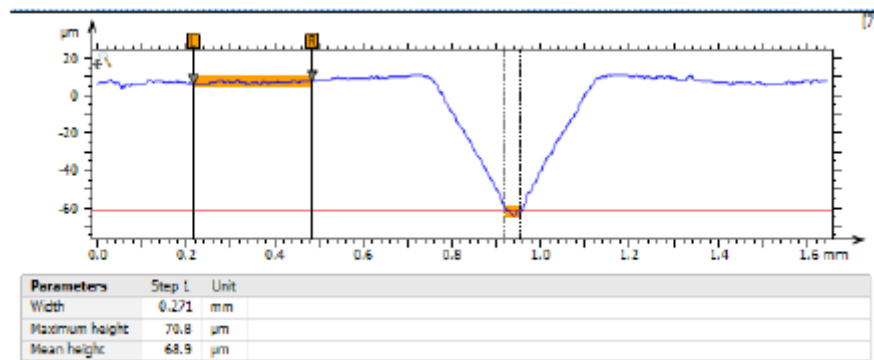


Figura 40: Medición de la profundidad.

La profundidad máxima es 70.8 μm y el valor medio es 68.9 μm . El valor medio aparece debido a las irregularidades en la superficie provocadas por la rugosidad del material como se ha explicado anteriormente.

A continuación en la Tabla 4 se presentan los datos de todos los poros organizados en función del tamaño; grande, mediano y pequeño, correspondientes a los agujeros realizados con el durómetro con 20kgf, 10kgf y 5kgf respectivamente.

	PORO	DIAGONAL 1 (mm)	DIAGONAL 2 (mm)	PROFUNDIDAD MÁXIMA (mm)
GRANDE	G1	0,457	0,466	0,0676
	G2	0,473	0,464	0,0708
	G3	0,475	0,478	0,0708
MEDIANO	M1	0,350	0,353	0,0472
	M2	0,356	0,349	0,0487
	M3	0,347	0,354	0,0497
PEQUEÑO	P1	0,236	0,246	0,0321
	P2	0,238	0,247	0,0318
	P3	0,236	0,242	0,0294

Tabla 4: Medidas del perfilómetro.

4.4.2.- MICROSCOPIO DIGITAL

Esta máquina consiste en una adaptación del microscopio tradicional, por lo que permite ampliar el área de interés para proceder a su medición. Mediante el empleo de una cámara digital y el software apropiado se puede observar el área de los microagujeros y medirlos. El inconveniente que presenta esta máquina es que sólo se puede trabajar en dos dimensiones por lo que no es posible analizar la profundidad, únicamente será posible medir la morfología de los poros pero resulta interesante para comprobar la eficacia de los otros métodos de medición.

La máquina cuenta con una luz LED que permite observar el área con mayor calidad de imagen (Figura 41), esta luz se puede regular en intensidad. Con la ayuda de un mando se colocará la cámara enfocando el área de interés de la superficie de las piezas de aluminio, donde se encuentran los microagujeros.

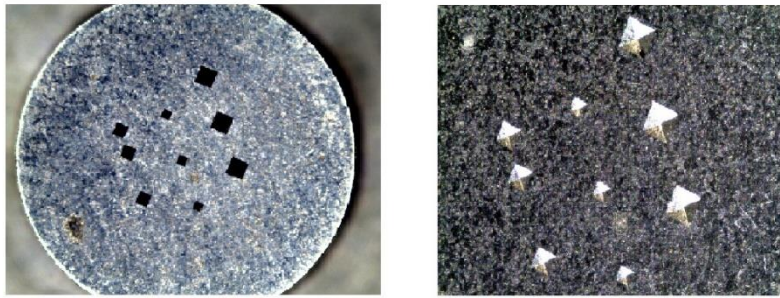


Figura 41: Vista de los microagujeros con el microscopio digital.

A continuación se describen los pasos necesarios para realizar las mediciones en 2D de los microagujeros:

1. Obtención de la imagen del área de interés:

En primer lugar es necesario orientar la cámara y ajustar la intensidad de la luz para obtener una imagen nítida. Para una mayor precisión en la medida es necesario centrar el microscopio en uno de los poros como se muestra en la Figura 42.

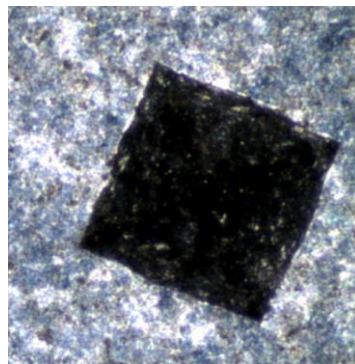


Figura 42: Visualización de un poro bajo microscopio digital.

2. Medición de los microagujeros:

Para poder analizar las dimensiones de los poros es necesario dibujarlos, para ello se dispone de una herramienta que permite trazar líneas sobre la superficie y definir el perfil del poro.

Se dispone de otra herramienta que permite mediar la distancia entre las líneas dibujadas, de esta forma es posible medir toda la superficie del agujero como se observa a continuación en la Figura 43.

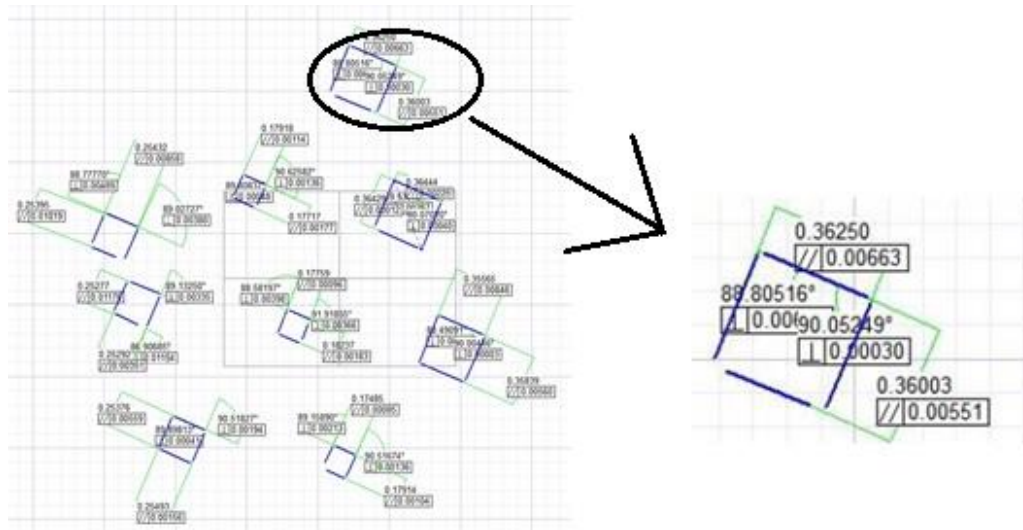


Figura 43: Medición con microscopio digital.

Las medidas tomadas de los microagujeros con el microscopio se corresponden a los lados por simplicidad de las operaciones. Los datos obtenidos mediante el perfilómetro y los que se obtendrán posteriormente con el tomógrafo se corresponden con las diagonales, por tanto es necesario calcular los datos de las diagonales a través del teorema del seno [47] para poder comparar los resultados.

En la Tabla 5 se muestran todas las dimensiones de las diagonales:

	PORO	DIAGONAL 1 (mm)	DIAGONAL 2 (mm)	PROFUNDIDAD MÁXIMA (mm)
GRANDE	G1	0,509	0,507	-
	G2	0,518	0,515	-
	G3	0,518	0,509	-
MEDIANO	M1	0,361	0,357	-
	M2	0,365	0,360	-
	M3	0,363	0,362	-
PEUQUEÑO	P1	0,249	0,245	-
	P2	0,254	0,254	-
	P3	0,254	0,249	-

Tabla 5: Medidas del microscopio digital.

5. VALIDACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA

En este apartado se analizarán los pasos necesarios para realizar las mediciones empleando Tomografía Computarizada. Se realizarán diferentes test sobre el sistema para proceder a la posterior medición de los microagujeros. Por último se analizarán los resultados obtenidos y se compararán con las mediciones realizadas mediante métodos topográficos.

5.1- OPERACIÓN DEL TOMÓGRAFO

Para realizar las mediciones de los microagujeros en el Tomógrafo es imprescindible el uso del soporte que se ha diseñado y analizado anteriormente. Este soporte servirá de unión entre las piezas metálicas a medir y el tomógrafo, aparte de desempeñar la función de elemento de presión que hace posible este experimento como ya se ha explicado.

A continuación se describen los pasos necesarios para realizar las mediciones mediante Tomografía Computarizada.

5.1.1- POSICIONAMIENTO

En primer lugar es necesario realizar el posicionamiento del soporte respecto de la máquina. Este paso es de gran importancia y hay que tener en cuenta el área de interés del soporte, la unión de las dos piezas metálicas donde se encuentran los microagujeros.

Para obtener la mayor resolución posible, el soporte se sitúa lo más próximo posible al emisor de rayos X. Esta aproximación del soporte al emisor debe dejar a la vez una separación de seguridad suficiente para asegurar que no se daña durante la operación.

El soporte debe quedar correctamente fijado para evitar movimientos indeseados durante la medición que podrían repercutir negativamente en los resultados.

Si se arranca el equipo es posible ver en directo la imagen de rayos X, esto permite mover el carro del soporte para orientarlo como más interese. En la Figura 44 se observa el soporte junto al emisor de rayos X del tomógrafo.

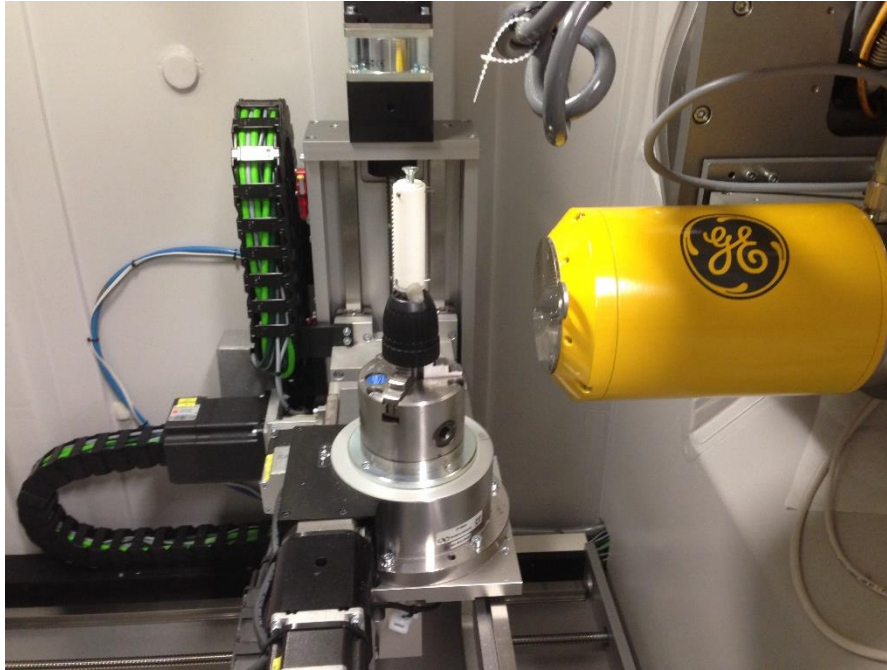


Figura 44: Posicionamiento del soporte en el tomógrafo.

5.1.2-COMPROBACIÓN DE CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

Una vez realizado el posicionamiento del soporte es necesario asegurar que el equipo esta calibrado para asegurar unas medidas precisas. Para realizar esto es necesario retirar el soporte y colocar en su lugar una barra de bolas calibrada. Esta barra consiste en dos bolas colocadas en los extremos de una barra de longitud $7.9551\text{mm} \pm 0.0010\text{mm}$.

La operación consiste en encender el tomógrafo y examinar la barra de calibración para comprobar las dimensiones que devuelve el programa una vez realizado el análisis de rayos X y la reconstrucción 3D, estas medidas no deben superar los $3\mu\text{m}$ de diferencia para asegurar que el equipo está calibrado. Se comprueba que el equipo está correctamente calibrado [48].

En caso de que el equipo realizara medidas incorrectas sería necesario calibrarlo. Para ello es necesario otra barra calibrada con varias bolas situadas a diferentes distancias. Se procede de igual forma a lo descrito anteriormente y se analiza la barra,

pero después se realiza una compensación de los datos obtenidos, como se puede observar en la Figura 45.

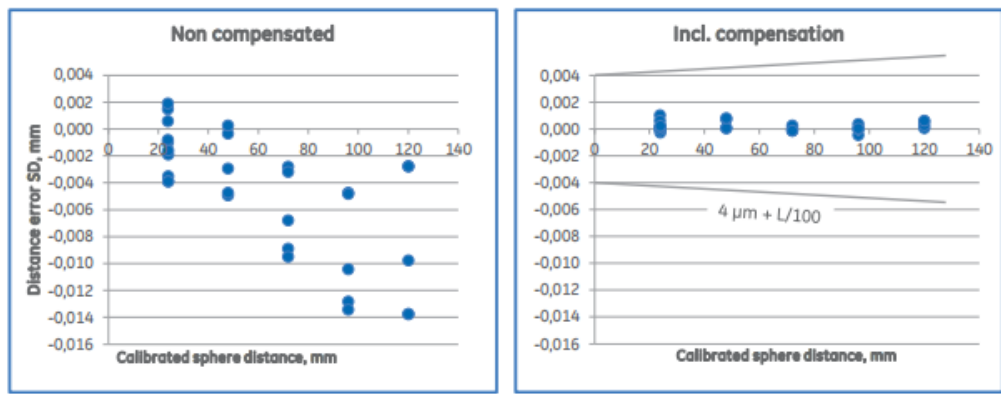


Figura 45: Errores de medida de distancia no compensados y compensados [48].

Con este análisis se consigue detectar problemas en la toma de las imágenes provocadas por movimientos indeseados o mala rotación de la muestra. En la Figura 46 se muestra el análisis de la barra calibrada mediante Tomografía Computarizada.

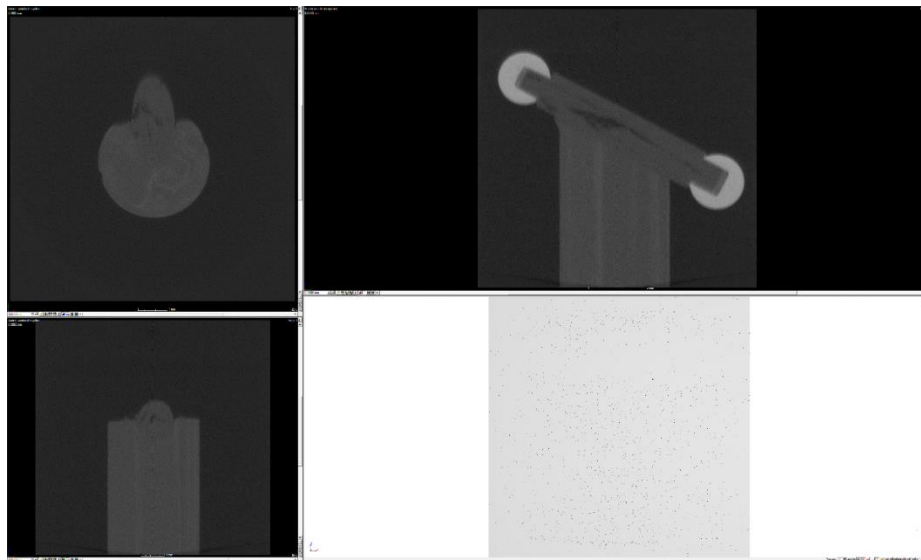


Figura 46: Análisis de la barra de bolas calibrada.

5.1.3- OPERACIÓN DEL TOMÓGRAFO

Se vuelve a colocar el soporte, con las piezas de aluminio en su interior, en la posición que se ha definido anteriormente. Se arranca el tomógrafo para que comience la radiación de rayos X y poder observar las imágenes de la muestra en vivo en la pantalla.

A continuación se selecciona el área que se quiere analizar, de forma que se enfoca esa parte, en este caso la unión de las dos piezas de aluminio donde se encuentran los microagujeros que simulan la porosidad.

Es necesario ajustar el voltaje y la intensidad de rayos X que se requiere. Este paso es de gran importancia para obtener una buena resolución que permita realizar mediciones precisas. A mayor voltaje es posible penetrar espesores mayores pero se pierde precisión. Como las piezas de aluminio de este experimento no tienen un gran espesor se elige un voltaje bajo que permite un mejor contraste. La intensidad implica la cantidad de radiación que es emitida, por tanto si se aumenta la intensidad se obtiene una mejor resolución. Hay que tener en cuenta que estos parámetros afectan directamente al tiempo de operación necesario para la digitalización de la muestra.

Se puede comprobar que los valores de voltaje e intensidad establecidos son adecuados para el análisis de esta muestra mediante el Histograma [49]. El Histograma muestra todas las intensidades de los píxeles de forma gráfica. El eje X es la intensidad medida y el eje Y el número de píxeles de cada exposición. Valores de intensidad superiores a 200 son suficientes para comenzar el proceso. En la Figura 47 se muestra el método de operación con la visualización en vivo de la muestra.

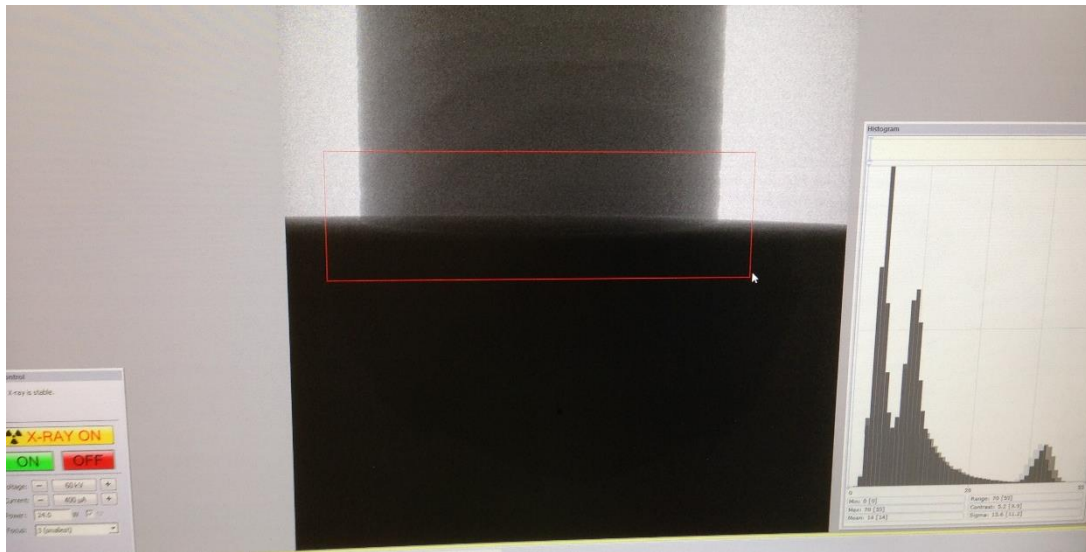


Figura 47: Visualización en vivo de la probeta, selección de área, ajustes de funcionamiento e Histograma.

Se controlan otras variables aparte de las mencionadas anteriormente;

- Tiempo empleado para tomar la imagen. Este factor afecta a la calidad de la imagen tomada. En ocasiones es mejor incrementar este tiempo y reducir la potencia para incrementar la calidad de la imagen.
- Número de imágenes en cada posición. Obtiene una media de los valores obtenidos en varias imágenes tomadas en una misma posición.
- Tiempo de espera después de cada movimiento del soporte antes de seguir midiendo. Permite evitar las fotos de baja calidad debido a vibraciones del movimiento.
- Número de imágenes para la reconstrucción.

5.1.4- RECONSTRUCCIÓN 3D

Una vez se han realizado todas las radiografías necesarias se puede comenzar con el proceso de reconstrucción.

En primer lugar utilizando el software del tomógrafo se realizan ciertos ajustes para mejorar la calidad de las imágenes obtenidas. Se aplican filtros de imagen y se comprueba la calidad de las imágenes 2D obtenidas de las radiografías.

En caso de que las imágenes no sean adecuadas para realizar las mediciones por baja calidad o vibraciones será necesario repetir el proceso de operación del tomógrafo y volver a realizar las radiografías cambiando los ajustes según sea necesario (voltaje, intensidad, posición, etc.).

Una vez aplicada la configuración adecuada a las imágenes es posible realizar la reconstrucción 3D mediante el programa “VG Studio 2.2”. Acabado este proceso se puede comenzar con las mediciones.

A continuación se muestra una reconstrucción 3D del área de interés de las probetas (Figura 48), en este caso se encuentran en contacto dos piezas de aluminio de diferente diámetro. En el cilindro de menor diámetro se encuentran los microagujeros realizados para el ensayo.

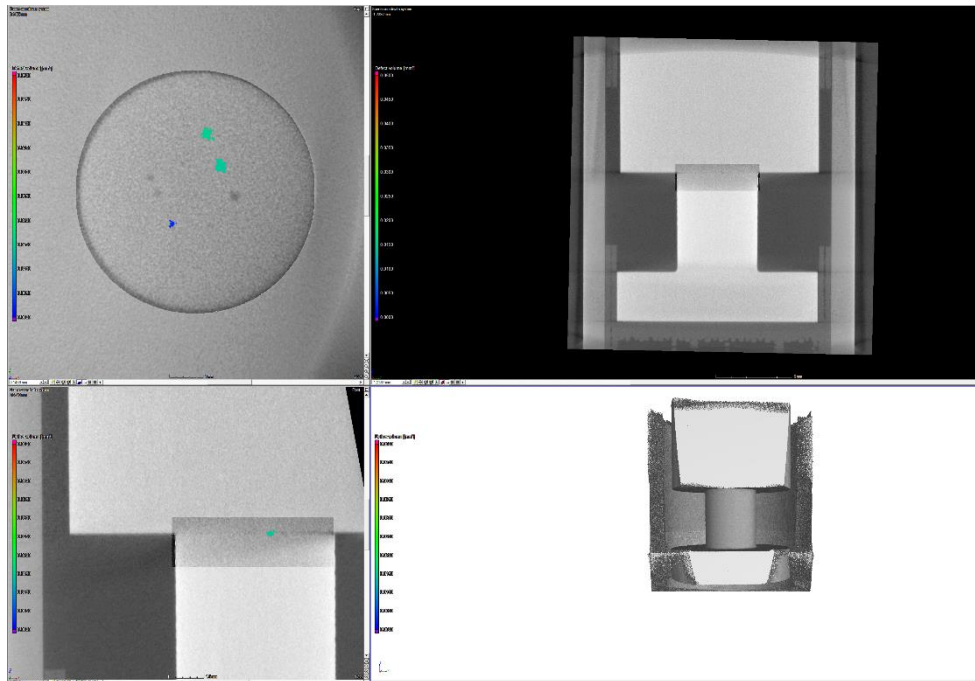


Figura 48: Reconstrucción 3D con filtros aplicados.

5.2- MEDICIONES TOMOGRÁFICAS

Una vez se ha concluido la reconstrucción 3D se puede proceder a localizar y medir los poros.

- TEST 1:

Para esta medición se va a trabajar con el emisor de rayos X más pequeño del que se dispone que permite obtener una mayor precisión y calidad, ya que no es necesario trabajar con altos voltajes debido a que se trata de piezas de aluminio de pequeño espesor. Se operará a 60kV y 400 μ A.

Tras haber completado todos los pasos descritos anteriormente y haber obtenido la reconstrucción 3D con los filtros aplicados sobre las imágenes se obtiene la imagen final que se observa en la Figura 49.

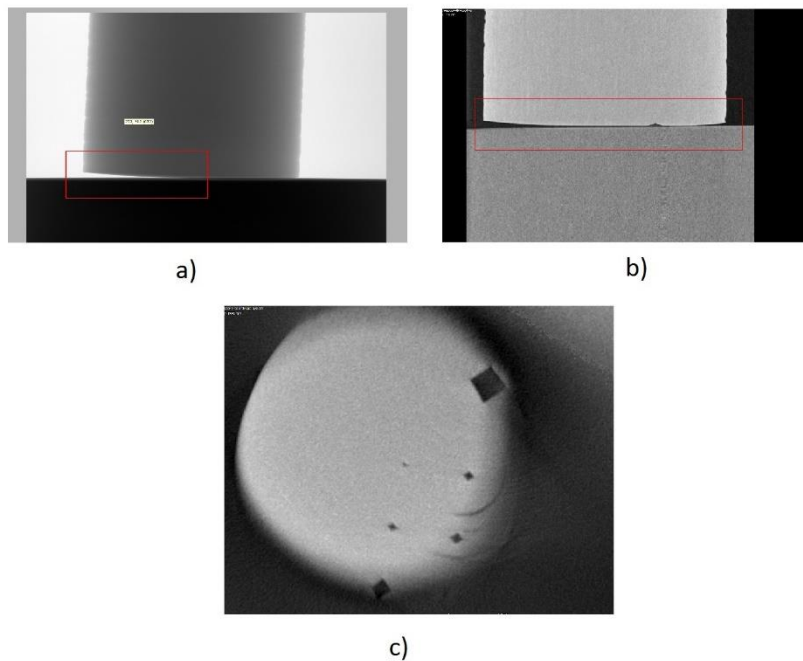


Figura 49: a) vista perfil 1; b) vista perfil 2; c) interior del cilindro (poros).

Tras este primer análisis de las probetas se observa claramente que las piezas de aluminio no se han unido correctamente. La separación entre las caras puede ser debida a diferentes razones; mal acabado o inclinación de las caras en contacto, mal posicionamiento de las piezas, aplicación de la presión del tornillo desproporcionada, etc.

Este problema afecta a la visualización de los microagujeros como se puede observar en la imagen anterior. El espacio que separa a las dos caras es demasiado grande e impide identificar correctamente los poros. Se intenta realizar un análisis de porosidad aún con los inconvenientes que se plantean pero no es posible ya que el programa identifica los microagujeros como parte de la superficie en lugar de discontinuidades internas.

Este primer test no es válido dado que no es posible simular las dos piezas de aluminio como un único sólido y medir los microagujeros. Dada esta experiencia se realizan ciertos cambios en el diseño del soporte con intención de solventar los problemas para las próximas mediciones.

5.2.1- REDISEÑO DEL SOPORTE

Se van a modificar las piezas de plástico que componen el soporte, estas modificaciones consisten principalmente en un cambio de dimensiones y alguna mejora para solventar los problemas que se han planteado en el primer test. También se modificarán las piezas de aluminio, realizando otra operación de acabado para aplanar correctamente las superficies que se encuentran en contacto y evitar espacios entre ellas.

❖ Base:

Se van a realizar varias mejoras con respecto a la base. En primer lugar se hará un poco más grande el agujero en el que encaja la pieza de aluminio ya que en el primer diseño la pieza encajaba con dificultad y eso podría ser una causa del mal posicionamiento de la pieza. También se hará dicho agujero más profundo para evitar la movilidad de la pieza de aluminio y que la base de mayor diámetro no sobresalga.

Se alargará la parte de unión con la máquina para realizar un mejor agarre y a la vez facilitar el montaje. En la Figura 50 se observa la base final.

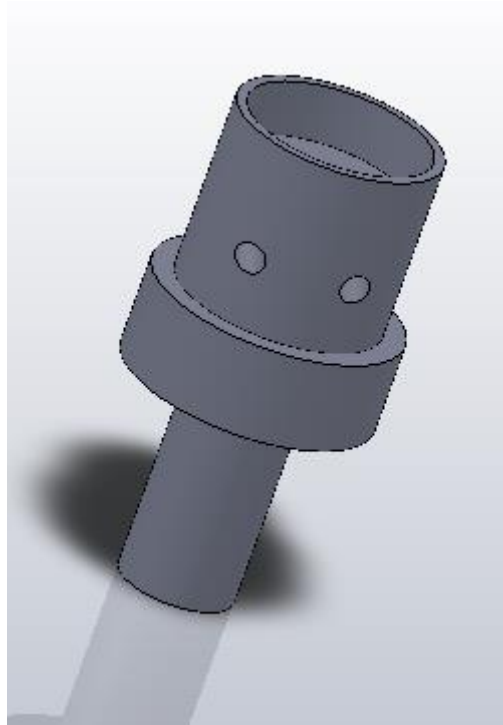


Figura 50: Rediseño de la base.

❖ Cubierta superior:

Al igual que en la base había dificultades para insertar las piezas de aluminio en el agujero de la cubierta superior y además sobresalía. Se aumenta el diámetro del agujero y se aumenta la profundidad para asegurar el buen posicionamiento de la pieza de aluminio superior.

Para proteger el metal se incrementa la altura de la cubierta. Se diseña en la parte superior un agujero para asegurar que el tornillo ejerce presión sobre el centro del sistema y así evitar una distribución de presión descompensada debido a la posible inclinación del tornillo. El agujero presenta forma cónica. El tornillo será a su vez modificado para que encaje en el agujero. La Figura 51 muestra el estado final.

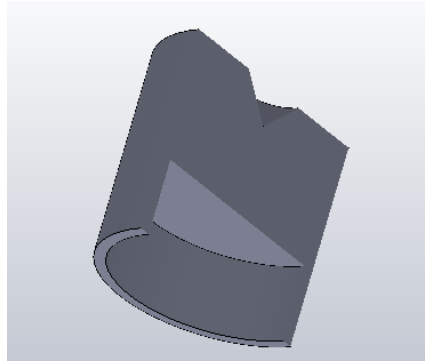


Figura 51: Rediseño cubierta superior.

❖ Cubierta tuerca:

Se van a realizar varias modificaciones en esta pieza. En primer lugar se reduce el tamaño del agujero en el que encaja la tuerca para asegurar que esta no se mueve, también se amplía la profundidad de dicho agujero para que la tuerca quede totalmente encajada. Los agujeros que fijan la pieza al tubo de plástico se localizarán más abajo y se aumentará la altura total de la cubierta. El agujero por el que pasa el tornillo será más delgado para evitar su movimiento en el interior. Por último, es necesario emplear un nuevo tornillo de mayor longitud. La cubierta tuerca modificada se muestra en la Figura 52.

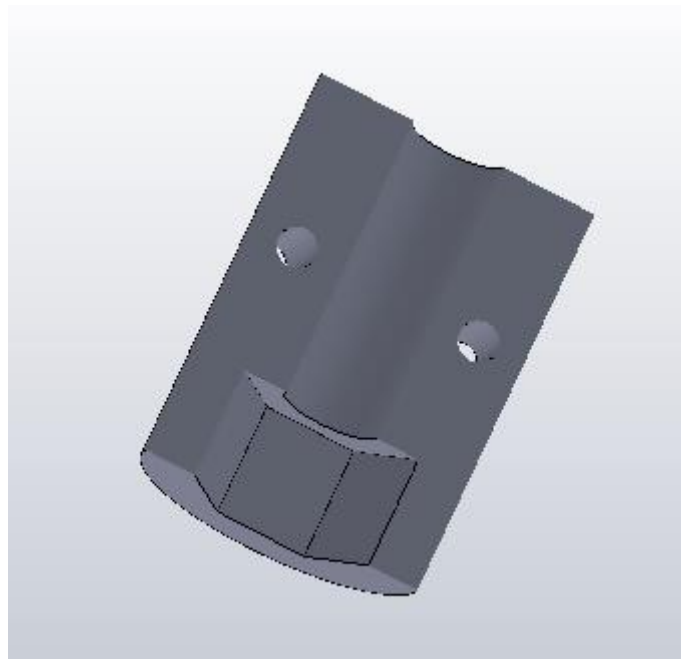


Figura 52: Rediseño de la cubierta tuerca.

❖ Tubo de plástico:

Es necesario cambiar las dimensiones del tubo de plástico debido a las modificaciones que se han realizado en las piezas que se encuentran en su interior. También es necesario cambiar la posición de los agujeros para que encajen con las piezas que corresponden y queden correctamente fijadas mediante los clavos. La longitud requerida después del rediseño es 75mm.

En la Figura 53 se muestran todas las piezas modificadas así como el conjunto ensamblado final.

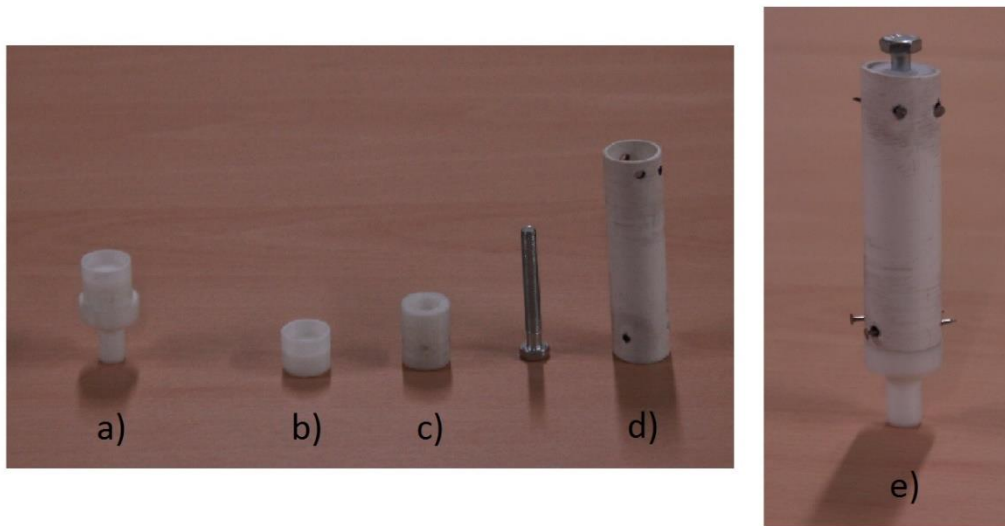


Figura 53: Rediseño; a) base; b) cubierta superior; c) cubierta tuerca; d) tubo de plástico; e) montaje final.

- Test 2:

Tras completar el rediseño y volver a montar el soporte es posible volver a repetir el proceso que se ha descrito anteriormente para intentar obtener mejores resultados que el test anterior.

Debido a un problema con el emisor de rayos X que se ha empleado hasta ahora es necesario cambiar a otro tubo de mayores dimensiones (Figura54). Este nuevo emisor está pensado para poder analizar piezas de mayor espesor o materiales más difíciles de penetrar (mayor densidad) mediante radiación ya que trabaja en unos regímenes de voltaje e intensidad mayores. Utilizando este

emisor se perderá algo de precisión pero debería ser suficiente para completar el experimento.

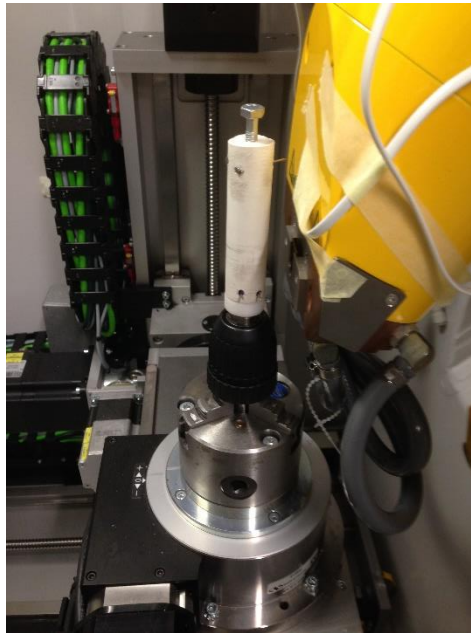


Figura 54: Posicionamiento del soporte con emisor grande.

Se repiten los pasos que se han descrito para poder realizar las mediciones: Posicionamiento, comprobación de la calibración, operación del tomógrafo y reconstrucción 3D.

En este caso se va a operar con un mayor voltaje debido al cambio que se ha realizado en el emisor (110KV) y a una intensidad de $100\mu\text{A}$. Se puede comprobar que estos valores son suficientes para penetrar las probetas mediante el Histograma (Figura 55) como se ha explicado antes.

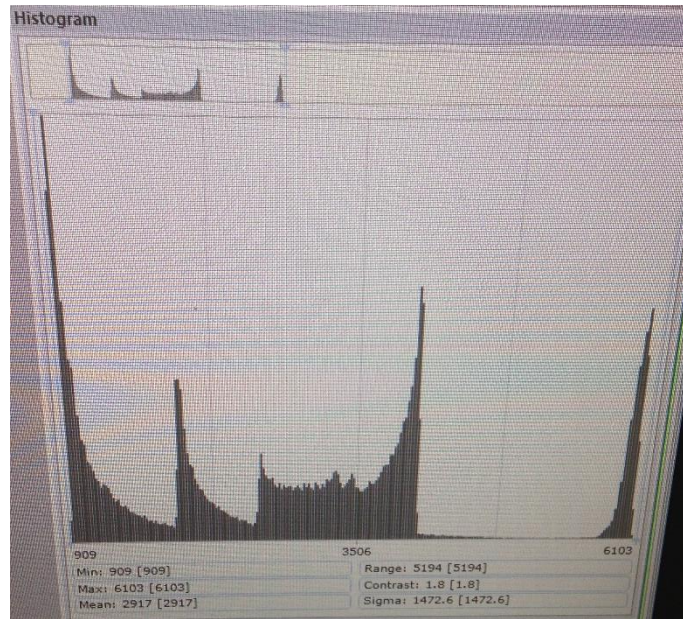


Figura 55: Histograma test 2. Valor mínimo 909>200.

Antes de proceder a las mediciones se observa la reconstrucción 3D y se aprecia claramente que los problemas presentes en el test 1 ya no aparecen. Se pueden diferenciar sin problema los 9 microagujeros realizados en la superficie de la probeta de aluminio como se puede observar en la Figura 56.

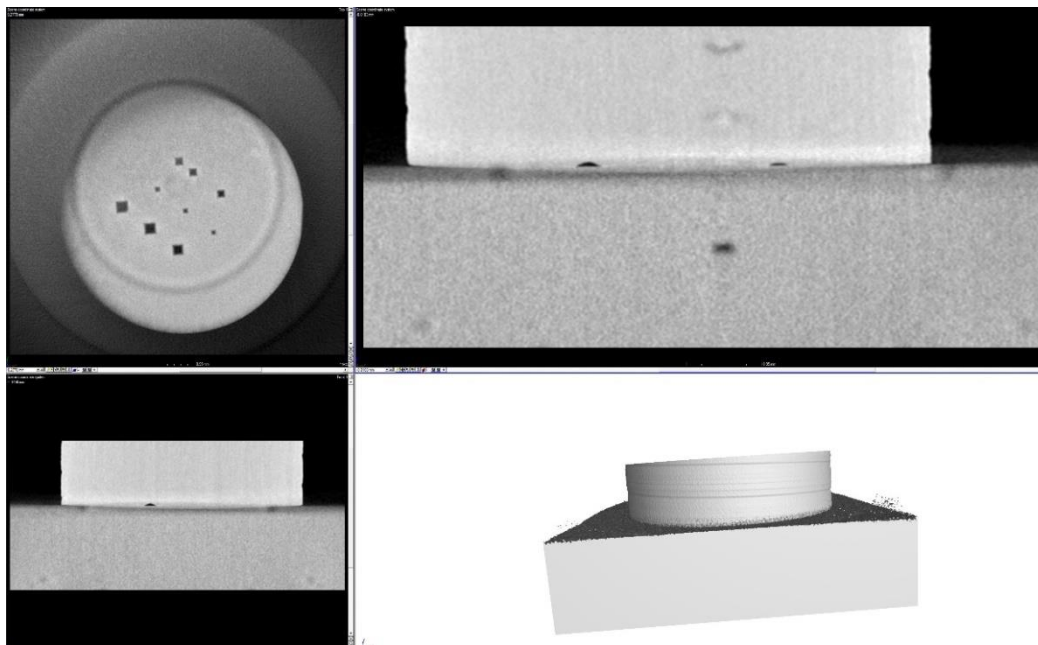


Figura 56: Reconstrucción 3D test 2.

Al realizar la búsqueda de porosidades con el programa no se detectan los microagujeros como tal sino que los identifica como si fueran parte de la superficie de la muestra como ocurría en el test anterior. Esto supone que el programa sigue sin identificar las dos piezas de aluminio como si de un único sólido se tratara, por lo que no es posible continuar con este test.

Se realizan nuevos ajustes en el sistema para corregir este problema. Se va a aplicar mayor presión entre las piezas de aluminio, apretando más el tornillo para intentar reducir al máximo posible el espacio libre entre las superficies, y que el programa no lo detecte como dos piezas distintas. También se van a modificar algunos parámetros de operación del tomógrafo así como aplicar filtros diferentes a las imágenes.

- TEST 3:

Se vuelven a cambiar algunos parámetros para intentar mejorar los datos obtenidos. En este caso se va a incrementar la potencia a 15W aumentando la intensidad para lograr mayor penetración en el metal. Se disminuye el tiempo empleado en tomar cada imagen. Se van a realizar un mayor número de radiografías para disponer de más imágenes para la reconstrucción. Se disminuye la magnificación, esto consiste en situar el soporte más alejado del emisor como se puede ver en la Figura 57.

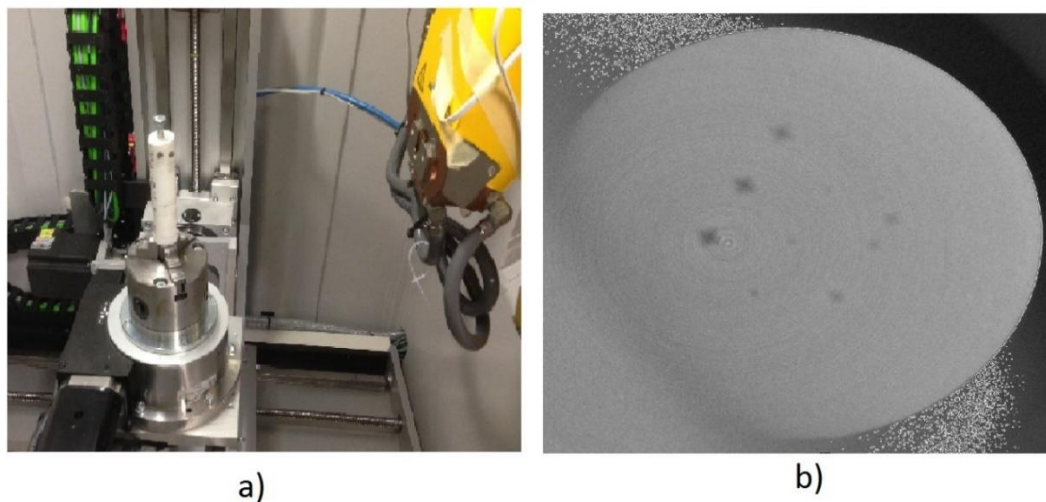


Figura 57: a) Posicionamiento del soporte; b) Visualización porosidad tras reconstrucción.

Se observa que las modificaciones realizadas han llevado a peores resultados que los del test anterior. Es difícil localizar los poros en la superficie y resultaría imposible medirlos ya que no se aprecia su morfología por falta de calidad.

- TEST 4:

Se realizan nuevos ajustes en el sistema tales como ejercer mayor presión a las piezas de aluminio así como cambios en los parámetros de medida del tomógrafo (mayor tiempo de toma de imágenes, menor intensidad, etc.). Se procede a repetir los pasos para poder obtener la reconstrucción de las piezas.

En esta ocasión se van a utilizar diferentes filtros que permiten diferenciar las distintas superficies de manera más exacta (aire, metal, plástico, etc.).

En la Figura 58 se presenta los resultados de la reconstrucción tras aplicar los filtros:

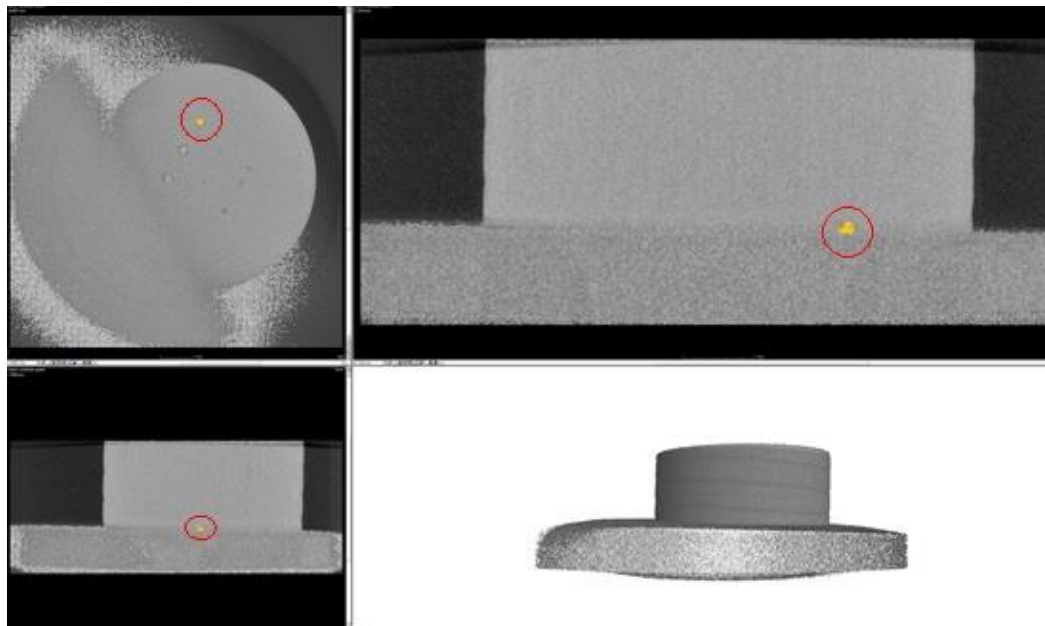


Figura 58: Reconstrucción test 4.

En esta ocasión al buscar porosidades el programa consigue localizar 4 de los microagujeros que se realizaron (aparecen en amarillo en la Figura 59). Solamente localiza los de mayor tamaño, el resto no se aprecian con claridad. Además aparecen zonas no diferenciadas entre las superficies de las dos probetas de aluminio.

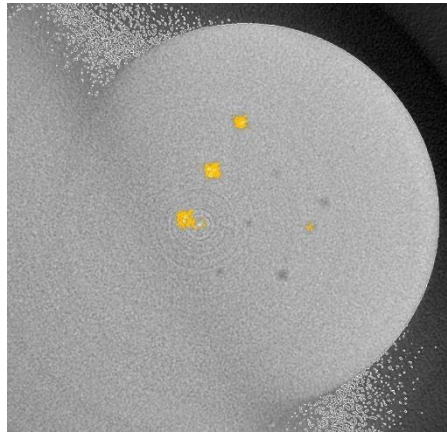


Figura 59: Detección de porosidad en test 4.

Es necesario continuar cambiando algunos parámetros del tomógrafo e ir aplicando diferentes filtros para intentar conseguir una mejor calidad de imagen, pero en este último test se comprueba que se está yendo por el camino correcto ya que se ha conseguido identificar más de un microagujero como defecto interno.

- TEST 5:

Debido a los buenos resultados que se han obtenido en el test anterior se van a mantener casi todos los parámetros y filtros, únicamente se va a incrementar la magnificación y a disminuir un poco la intensidad ($80\mu\text{A}$).

Los resultados de la reconstrucción son los observados en la Figura 60:

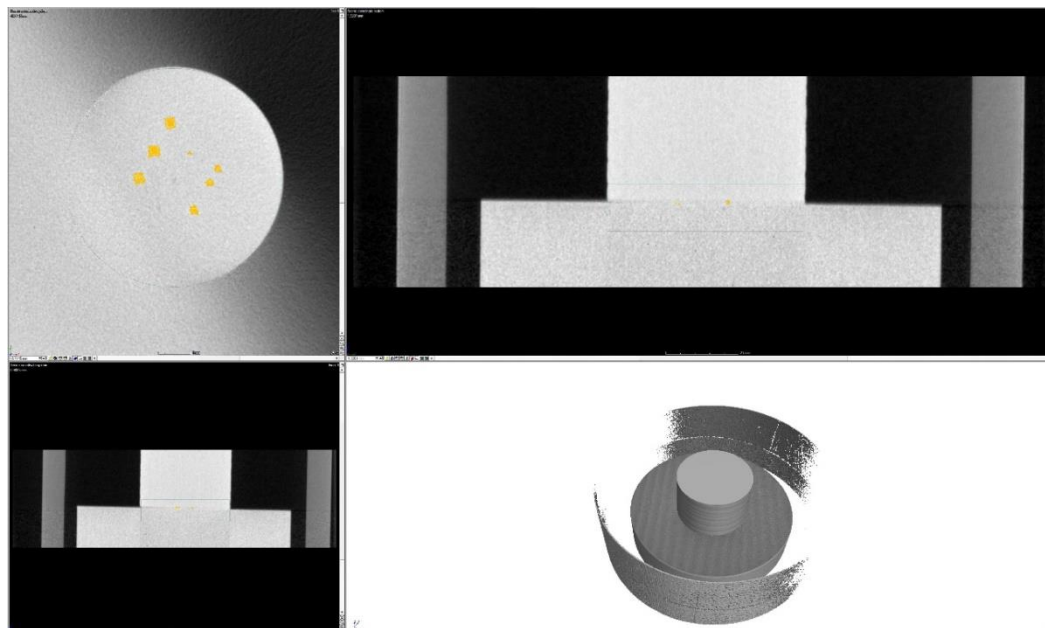


Figura 60: Reconstrucción test 5.

En este caso es posible identificar en las imágenes las piezas de plástico pero eso no afecta al estudio.

Se realiza el análisis en busca de porosidades y se filtran los resultados en función del volumen para localizar los microagujeros. El programa identifica 7 de los 9 microagujeros pero la calidad de imagen es bastante baja y aunque sería posible realizar las mediciones de estos 7 poros estas no serían precisas. Además se está buscando el análisis de todos los microagujeros en un mismo análisis para su posterior medición.

- TEST 6:

En esta ocasión se va a probar a realizar las mediciones del soporte con este levemente inclinado. El soporte se inclina para cambiar el camino que siguen los electrones al impactar con las piezas, experimentalmente se sabe que es posible obtener mejores resultados en las radiografías.

Dado que los filtros aplicados en el test 4 dieron muy buenos resultados, se van a aplicar los mismos tras la reconstrucción. Se aleja la pieza del emisor, aunque se consiga una menor magnificación, ya que el soporte necesita más espacio para girar durante la toma de radiografías al estar inclinado.

Los resultados de la reconstrucción tienen el aspecto de la Figura 61:

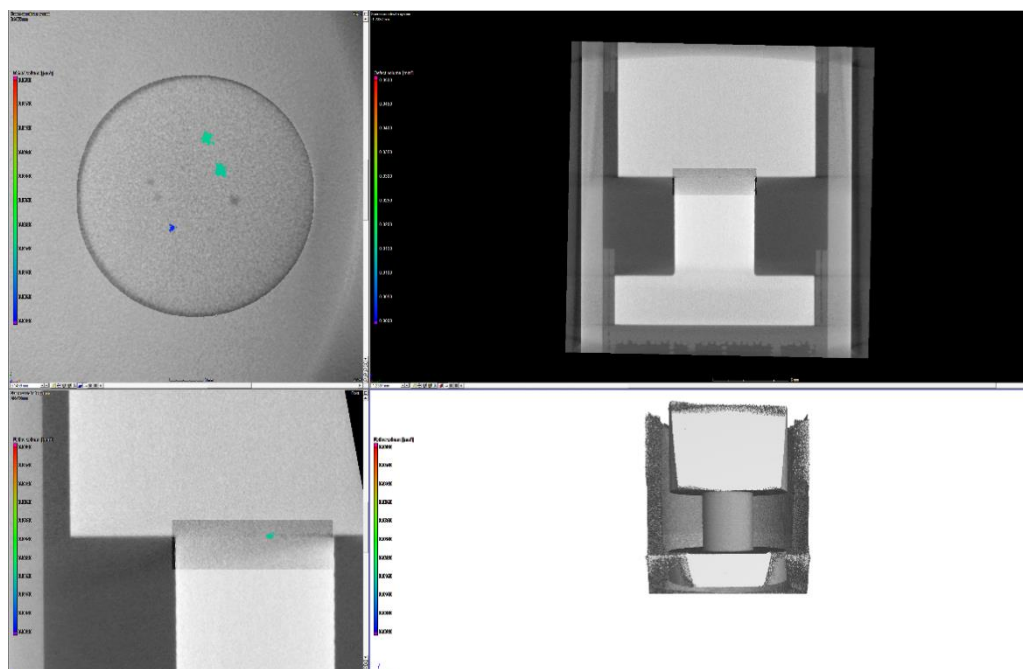


Figura 61: Reconstrucción test 6.

Los resultados obtenidos no son lo esperado. La penetración de la radiación es insuficiente y no es posible visualizar la porosidad. El programa detecta únicamente 3 microagujeros y los más pequeños no son apreciables dada la baja calidad de imagen.

Aplicando nuevos filtros se intenta aislar el área de interés y deshacer el contraste creado por las piezas de plástico que aparecen en la reconstrucción. Se obtiene lo presentado en la Figura 62:

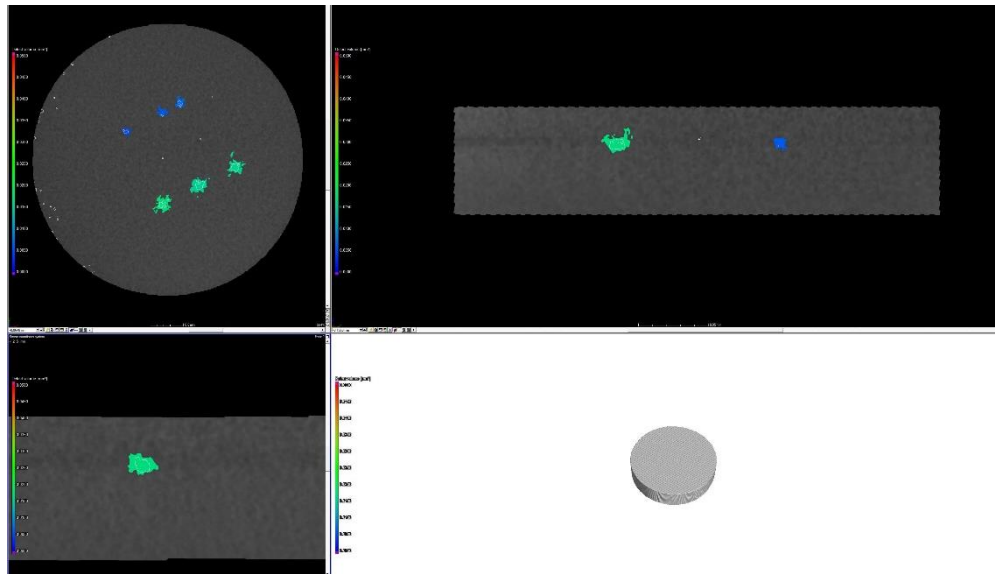


Figura 62: Análisis de porosidad test 6.

Los datos obtenidos permiten la medición de los 6 poros de mayor tamaño pero de manera poco precisa. Al igual que en el test anterior no se va a proseguir con la toma de medidas dado que este trabajo intenta medir todos los microagujeros de la manera más precisa posible para poder validar el uso de la Tomografía Computarizada.

Al analizar los ensayos realizados hasta ahora se puede observar que el test 2 es el único que permite la localización de todos los microagujeros con una buena calidad. Es por ello que se va a partir de la digitalización realizada en el test 2 de la muestra y se van a aplicar diferentes filtros para solventar el problema que este presentaba, identificaba los microagujeros como parte del perfil en lugar de tratarlos como porosidades como interesa.

- TEST 7:

Una vez aplicados diferentes filtros sobre las digitalizaciones del test 2 se realiza el análisis de porosidad. Se comprueba que el programa detecta todos los microagujeros como poros al filtrar los resultados del análisis de porosidad en función del volumen.

En la Figura 63 se pueden observar todos los poros diferenciados por colores en función de su volumen, siendo el rojo el mayor volumen ($V = 0.005mm^3$) y el azul claro el menor volumen ($V = 0.0005mm^3$).

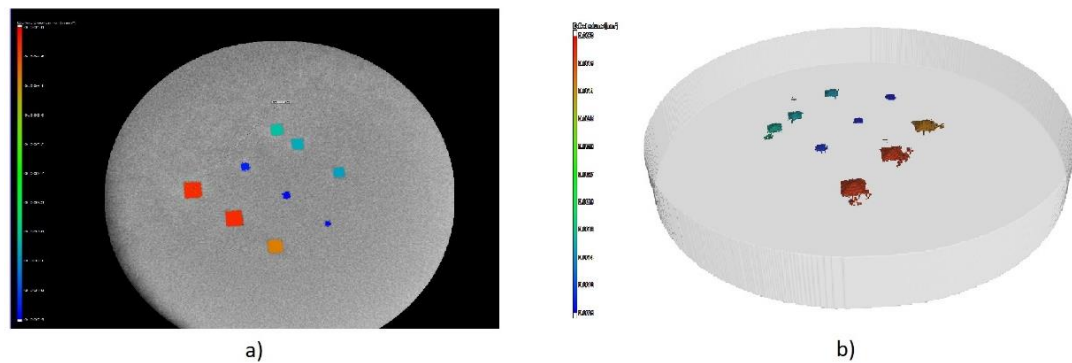


Figura 63: Test 7: a) Análisis porosidad; b) Reconstrucción 3D.

Una vez han sido detectados todos los poros y se dispone de una calidad de imagen aceptable es posible comenzar con las mediciones de las porosidades y obtener un resultado preciso.

Para la medición de los poros se emplea el programa “VG Studio 2.2” que cuenta con varias herramientas para medición. Se va a emplear la herramienta del calibre dado que interesa conocer las diagonales de los poros (distancia entre dos líneas paralelas) y es más preciso en este caso.

Se realizarán medidas de ambas diagonales así como de la profundidad del poro para poder compararlas con los datos obtenidos mediante métodos topográficos.

Para realizar las medidas se analizan los poros uno a uno como se describe a continuación:

- Se parte de la reconstrucción general. En las diferentes pantallas que presenta el programa (Figura 64) es posible moverse a través del interior de la pieza con respecto a 3 planos perpendiculares lo que permite localizar cada uno de los poros y medir todas sus dimensiones.

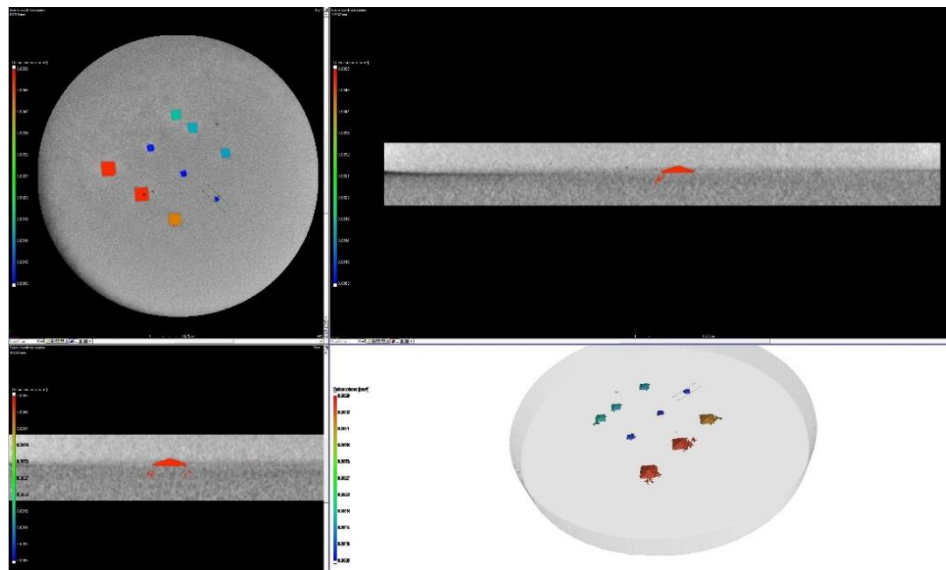
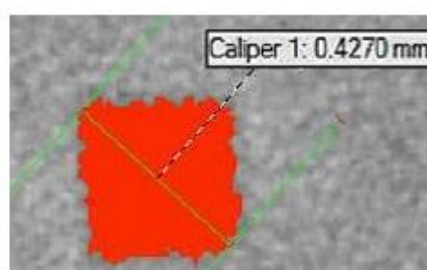
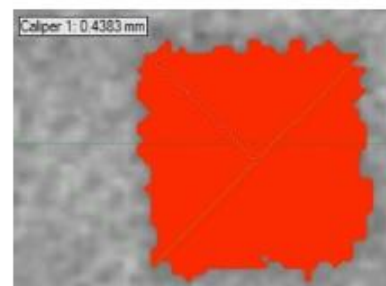


Figura 64: Planos de la reconstrucción 3D del test 7.

- Medición de las diagonales: En la Figura 65 se muestra como se aplica el calibre para medir las diagonales. Para el poro G1 que se muestra como ejemplo de medición se obtienen unos valores $D1=0.4270\text{mm}$, $D2=0.4383\text{mm}$.



a)



b)

Figura 65: Poro G1 a) diagonal 1; b) diagonal 2.

- Medición de la profundidad: Usando de nuevo el calibre como se muestra en la Figura 66 se mide la profundidad. En el poro G1 que se muestra de ejemplo se obtiene un valor $H=0.0735\text{mm}$.

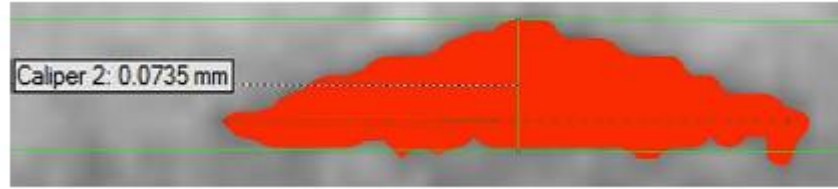


Figura 66: Poro G1; Medida de profundidad.

Se realizan estas operaciones con todos los poros para obtener los resultados que se muestran en la Tabla 6:

	PORO	DIAGONAL 1 (mm)	DIAGONAL 2 (mm)	PROFUNDIDAD MÁXIMA (mm)
GRANDE	G1	0,4270	0,4383	0,0735
	G2	0,4352	0,4214	0,0612
	G3	0,4228	0,4160	0,0713
MEDIANO	M1	0,2861	0,2796	0,0536
	M2	0,2861	0,2862	0,0536
	M3	0,2951	0,2862	0,0436
PEUQUEÑO	P1	0,2056	0,1969	0,0526
	P2	0,1978	0,1906	0,0411
	P3	0,2047	0,1856	0,0415

Tabla 6: Medición de porosidad mediante Tomografía Computarizada.

5.3- ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se va a realizar un análisis de los resultados de las mediciones de los microagujeros realizadas mediante Tomografía Computarizada. A primera vista parecen bastante coherentes ya que los valores de las diagonales son bastante similares entre ellos, lo que tiene sentido ya que el penetrador del durómetro tiene forma cuadrada. También se puede apreciar que los valores de los grupos de poros grandes, medianos y pequeños son similares entre sí ya que están realizados con la misma fuerza.

En la Tabla 7 se muestra la diferencia de los valores obtenidos experimentalmente y los esperados de forma teórica para cada poro:

	PORO	DIFERENCIA DIAGONAL 1 (μm)	DIFERENCIA DIAGONAL 2 (μm)	DIFERENCIA PROFUNDIDAD (μm)
GRANDE	G1	87,6427	76,3427	0,0213
	G2	79,4427	93,2427	12,3213
	G3	91,8427	98,6427	2,2213
MEDIANO	M1	77,8074	84,3074	1,6126
	M2	77,8074	77,7074	1,6126
	M3	68,8074	77,7074	8,3874
PEQUEÑO	P1	51,7214	60,4214	15,8393
	P2	59,5214	66,7214	4,3393
	P3	52,6214	71,7214	4,7393

Tabla 7: Diferencia de resultados Tomografía - teórico.

Se observa que hay una diferencia bastante grande entre los valores calculados teóricamente y los obtenidos de forma experimental. Las mediciones experimentales son hasta un 30% más pequeñas de lo que se ha calculado experimentalmente. Esto tiene una fácil explicación y es que se ha empleado el durómetro para realizar los microagujeros cuando esta no es la función para la que se ha diseñado la máquina.

El durómetro aplica una fuerza (20kgf, 10kgf o 5kgf según corresponda) sobre la superficie del metal con la finalidad de medir la dureza a partir de la geometría del agujero que deja el penetrador de diamante.

En este caso al emplearse el durómetro para realizar los microagujeros el tiempo de exposición del penetrador ha sido menor al debido para realizar el ensayo de dureza Vickers, es por esto que el penetrador ha realizado agujeros de menores dimensiones. A parte de esto se ha supuesto una dureza de 140 HV de la muestra empleada basándose en tablas estipuladas para dicho material pero no es una magnitud precisa por lo que la dureza de las muestras empleadas en este experimento puede ser distinta a la empleada para los cálculos.

5.4- COMPARACIÓN RESULTADOS TOPOGRÁFICOS

En este apartado se va a analizar la validez de las mediciones obtenidas por Tomografía Computarizada comparándolas con las obtenidas mediante el Perfilómetro y el microscopio digital.

En la Tabla 8 se presentan las diferencias entre las medidas obtenidas con el Perfilómetro y las obtenidas mediante Tomografía Computarizada.

	PORO	DIFERENCIA DIAGONAL 1 (μm)	DIFERENCIA DIAGONAL 2 (μm)	DIFERENCIA PROFUNDIDAD (μm)
GRANDE	G1	30,0	27,7	5,9
	G2	37,8	42,6	9,6
	G3	52,2	62,0	0,5
MEDIANO	M1	63,9	73,4	6,4
	M2	69,9	62,8	4,9
	M3	51,9	67,8	6,1
PEQUEÑO	P1	30,4	49,1	20,5
	P2	40,2	56,4	9,3
	P3	31,3	56,4	12,1

Tabla 8: Comparación resultados: Tomografía - Perfilometría.

La máxima diferencia entre las mediciones de las diagonales de los perfiles de los poros es 73,4 μm , y se encuentra en la medición del primer poro mediano (M1) en la segunda diagonal.

La mínima diferencia entre los valores del Perfilómetro y del tomógrafo es 27,7 μm (poro G1 segunda diagonal). Se observa que todas las mediciones realizadas mediante Tomografía Computarizada son menores que las obtenidas mediante Perfilometría. Se supone que estos errores son debidos a que mediante los métodos tradicionales de medida, es el operario el que selecciona el área a medir mientras que utilizando la Tomografía Computarizada es el programa el que realiza la búsqueda del perfil. Como se ha visto anteriormente en los test del tomógrafo se han presentado varios problemas a la hora de localizar los poros por lo que no se puede asegurar tampoco una correcta selección de ellos y por tanto una buena reconstrucción 3D para realizar las medidas.

Las mediciones de la profundidad presentan una máxima variación de 20,5 μm (P1) y mínima de 0,5 μm (G3) entre las medidas del tomógrafo y del perfilómetro. En el caso de la profundidad el tomógrafo mide valores tanto mayores como menores con respecto a las mediciones del perfilómetro independientemente. Esto aclara la suposición realizada anteriormente que es un problema de precisión a la hora de seleccionar el área del poro, o la profundidad máxima, que se desea medir.

En la Tabla 9 se muestran las diferencias entre las mediciones del microscopio digital y las obtenidas con el tomógrafo.

	PORO	DIFERENCIA DIAGONAL 1 (μm)	DIFERENCIA DIAGONAL 2 (μm)
GRANDE	G1	82,0	68,7
	G2	82,8	93,6
	G3	95,2	93,0
MEDIANO	M1	74,9	77,4
	M2	78,9	73,8
	M3	67,9	75,8
PEUQUEÑO	P1	43,4	48,1
	P2	56,2	63,4
	P3	49,3	63,4

Tabla 9: Comparación resultados: Tomografía-Microscopio.

La máxima diferencia se encuentra en el poro G3 y es de 95,2 μm y la menor es 43,4 μm , localizada en el poro P1, comparando las medidas obtenidas mediante Tomografía y con el microscopio digital. Como ya se explicó anteriormente no hay mediciones de profundidad para comparar ya que el microscopio realiza un análisis bidimensional de la superficie. Se observa que todas las mediciones tomográficas son menores que las obtenidas mediante el microscopio digital al igual que con el perfilómetro y se llega a la misma conclusión, que la diferencia surge de la selección del área a medir.

En la Figura 67, poro 3D analizado con el perfilómetro, se puede apreciar claramente el poro pero resulta muy difícil limitar su contorno para realizar las medidas, por lo que las medidas están muy influenciadas por el error humano.

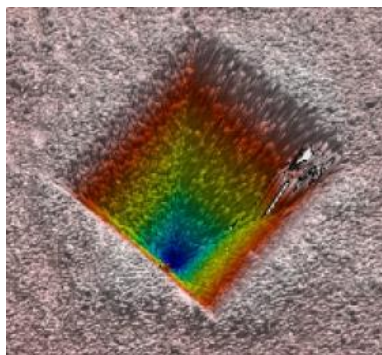


Figura 67: Imagen 3D de poro en Perfilómetro.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1- CONCLUSIONES

A lo largo de esta memoria se ha demostrado como la Tomografía Computarizada es un método válido para analizar la porosidad en aleaciones de aluminio. Se han podido medir con precisión las porosidades encerradas dentro de un sólido. Los resultados obtenidos, aunque menos precisos que las mediciones topográficas, presentan muy buenos resultados con diferencias menores a 0.1mm respecto a los ensayos destructivos.

Cabe destacar que el interés principal de la Tomografía Computarizada reside en poder analizar la geometría tridimensional de las discontinuidades internas, sin necesidad de destruir la muestra, de forma que se pueda valorar su impacto, y esto se ha logrado a través de los ensayos realizados.

A la hora de realizar las mediciones mediante Tomografía Computarizada se han presentado varios errores. El primero de ellos es la imposibilidad de utilizar el emisor de menores dimensiones debido a un fallo del equipo. Su empleo hubiera proporcionado una mayor precisión y calidad al análisis debido a que las condiciones operativas de este experimento, pequeños espesores y material fácilmente penetrable mediante radiación, no requieren de tanta potencia. El emisor empleado tiene un rango de trabajo mucho mayor al necesario en este proyecto lo que supone que se haya empleado en el mínimo régimen de potencia posible.

Como se ha observado en los test realizados por el Tomógrafo, localizar de forma precisa los microagujeros en la pieza ha sido laborioso, pudiendo provocar que la reconstrucción 3D no se realice de forma óptima y cree confusión en las mediciones.

Las imágenes obtenidas de forma óptica (por métodos topográficos) presentan una calidad mayor en este proyecto, lo que permite una mayor precisión en la medición.

Gracias a los resultados obtenidos se puede concluir que se han logrado superar todos los objetivos iniciales del proyecto y se ha comprobado que la Tomografía Computarizada es un método no destructivo válido y preciso para analizar la porosidad de las aleaciones de aluminio.

6.2- LÍNEAS FUTURAS

En primer lugar cabe destacar que el uso de un emisor de rayos X de menores dimensiones, que trabaje en un régimen de potencia menor, permitiría una mejor calidad de las imágenes obtenidas así como una mayor precisión en las medidas dado que no es necesario emplear un alto voltaje ni intensidad para penetrar las probetas de este ensayo. Habría que analizar la situación si se cambiaran espesores o materiales para adecuar el voltaje y la intensidad necesaria para penetrar en ellos.

Se podría mejorar el experimento que se ha realizado reforzando el soporte. Fabricar el soporte con componentes metálicos, en lugar de plástico, aseguraría mejor el posicionamiento de las piezas de aluminio y a la vez sería posible aplicarles una mayor presión para unir las superficies. Este cambio sería de gran valor ya que al someter el plástico a una gran presión se deforma con facilidad y la distribución de fuerzas no es uniforme. Además la unión de las piezas de plástico con el tubo exterior se podría realizar con otros elementos metálicos más resistentes (en lugar de clavos) que permitieran una fijación más sólida.

Aunque ha sido posible realizar una reconstrucción tridimensional de las muestras, una aplicación de gran importancia que tendría este estudio es la posibilidad de exportar el archivo para realizar un estudio mediante modelos de Elementos Finitos. Una vez realizado esto es posible analizar la pieza y observar como las porosidades, actuando como áreas de concentración de tensiones, pueden provocar rotura prematura. Esto permite validar una pieza para su uso y probar si las porosidades presentes presentan algún problema en la vida útil de la muestra.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cuyás, J. C., Mugica, G. W., Tovio, D. O., & González, A. C. (2002). Relación entre porosidad y propiedades mecánicas en tracción de aleaciones de aluminio de moldeo. Estado del conocimiento. *Revista de metalurgia*, 38(2), 139-149.
- [2] Pastor, M., Zhao, H., & DebRoy, T. (2000). Formación de porosidad durante la soldadura láser de Nd: YAG de onda continua en aleaciones de aluminio para aplicaciones automotrices. *Revista de Metalurgia*, 36(2), 108-117.
- [3] UNAM.MX. “Aluminio”. [Internet] Disponible en:
http://www.ingenieria.unam.mx/herescas/papime/alumnos_herecas/Materiales/PO-Tema4.5-Aluminio%20_S2006-2_Texto.pdf (Última visita 15/03/2016)
- [4] Aluminium for Future Generations. “The Bayer Process”. [Internet] Disponible en:
<http://bauxite.worldaluminium.org/refining/process.html> (Última visita 20/03/2016)
- [5] King, F. (1992). *El aluminio y sus aleaciones*. Limusa.
- [6] Aluminium Leader. “Aluminium history”. [Internet] Disponible en:
http://www.aluminiumleader.com/history/industry_history (Última visita 15/03/2016)
- [7] The Aluminum Association. “Industries”. [Internet] Disponible en:
<http://www.aluminum.org/industries> (Última visita 17/03/2016)
- [8] Ingeniería de Materiales. “Manual del Aluminio y sus Aleaciones”. [Internet] Disponible en: <https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/> (Última visita 20/03/2016)
- [9] Metal Actual. “Aleaciones de Aluminio y su Importancia en la Industrial Aeroespacial”. [Internet] Disponible en:
http://www.metalactual.com/revista/31/materiales_aleaciones.pdf (Última visita 18/03/2016)

- [10] Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión. “*Aluminio y Aleaciones de Aluminio*”. [Internet] Disponible en: <http://www.iesremedios.es/wp-content/uploads/t-2-23-rev-2-aluminio-y-aleaciones.pdf> (Última visita 23/06/2016)
- [11] The Aluminum Association. “*Castings*”. [Internet] Disponible en: <http://www.aluminum.org/industries/processing/castings> (Última visita 07/04/2016)
- [12] Custom Part. “*Die Casting*”. [Internet] Disponible en: <http://www.custompartnet.com/wu/die-casting> (Última visita 07/04/2016)
- [13] Fredriksson, H., & Åkerlind, U. (2006). *Materials processing during casting*. John Wiley & Sons Inc.
- [14] Learn Easy. “*Casting Processes*”. [Internet] Disponible en: <http://www.learneasy.info/MDME/MEMmods/MEM30007A/processing/processing.html> (Última visita 09/04/2016)
- [15] Total Materia. “*Aluminum Casting Processes*”. [Internet] Disponible en: <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=59> (Última visita 10/04/2016)
- [16] Blog de Jessica Aristizabal. “*Proceso de fundición de metales*”. [Internet] Disponible en: <http://jessicaaristizabal.blogspot.es/1391976302/proceso-de-fundicion-de-metales/> (Última visita 13/04/2016)
- [17] Matildesalvadortecno. “*Conformado por fusion y moldeo*”. [Internet] Disponible en: <http://matildesalvadortecno.wikispaces.com/2+Conformaci%C3%B3n+por+fusi%C3%B3n+y+moldeo?showComments=1> (Última visita 16/04/2016)
- [18] Loizaga, A., Sertucha, J., & Suárez, R. (2008). Defectos metalúrgicos generados por la presencia de gases en el metal fundido. In *Anales de la Real Sociedad Española de Química* (No. 2, pp. 111-119). Real Sociedad Española de Química.
- [19] Nicoletto, G., Konečná, R., & Fintova, S. (2012). Characterization of microshrinkage casting defects of Al–Si alloys by X-ray computed tomography and metallography. *International Journal of Fatigue*, 41, 39-46.

- [20] Rajkolhe, R., & Khan, J. G. (2014). Defects, causes and their remedies in casting process: A review. *International Journal of Research in Advent Technology*, 2(3), 375-383.
- [21] TUV NORD. “Prueba de estanqueidad en tuberías”. [Internet] Disponible en: <http://www.tuv-nord.com/es/asistencia-tecnica-industrial/pruebasde-estanqueidad-527.htm> (Última visita 12/05/2016)
- [22] Wang, Q. G., Apelian, D., & Lados, D. A. (2001). Fatigue behavior of A356-T6 aluminum cast alloys. Part I. Effect of casting defects. *Journal of Light Metals*, 1(1), 73-84.
- [23] Monografías. “Proceso de fundición de piezas metálicas”. [Internet] Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf5/proceso-fundicion-piezas-metalicas/proceso-fundicion-piezas-metalicas.shtml> (Última visita 23/04/2016)
- [24] Guillén, L. E. V., Nerey, L., & Guedez, V. (2011). Modelo predictivo de la rugosidad y porosidad en aluminio Al3003-B14 y Al6063-T6 anodizado usando análisis multi-factorial. *Ciencia e Ingeniería*, 32(2), 105-112.
- [25] Li, F., Zhang, L., & Metzger, R. M. (1998). On the growth of highly ordered pores in anodized aluminum oxide. *Chemistry of materials*, 10(9), 2470-2480.
- [26] Metal test. “ensayos metalográficos”. [Internet] Disponible en: <http://metaltest.org/servicios/ensayo-de-materiales/ensayos-metalograficos/> (Última visita 26/06/2016)
- [27] Monografías. “Radiografía Industrial”. [Internet] Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos30/radiografia-industrial/radiografia-industrial.shtml> (Última visita 28/06/2016)
- [28] Metalografía-Universidad Tecnológica de Pereira. “Ensayos no destructivos”. [Internet] Disponible en: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/> (Última visita 28/06/2016)
- [29] AFS. “Casting Quality Test Methods”. [Internet] Disponible en: <http://www.afsinc.org/content.cfm?ItemNumber=6955> (Última visita 30/06/2016)

- [30] Materiales. “*Ensayos no destructivos*”. [Internet] Disponible en:
http://190.105.160.51/~material/materiales/presentaciones/ensayos_no_destruct_we b.pdf (Última visita 30/06/2016)
- [31] Vander Voort, G. F. (1984). *Metallography, principles and practice*. ASM International.
- [32] Carmignato, S. (2013). Computed tomography as a promising solution for industrial quality control and inspection of castings. *Metallurgical Science and Technology*, 30(1).
- [33] Application for Computed Tomography in Metrology for Micro Manufacturing. [Internet] Disponible en:
http://www.dti.dk/_root/media/54987_Application%20for%20Computed%20Tomography%20in%20Metrology%20for%20Micro%20Manufacturing%20Tosello.pdf (Última visita 18/08/2016)
- [34] Prokop, J., Švéda, L., Jančárek, A., & Pína, L. (2009). Porosity measurement method by X-ray computed tomography. In *Key Engineering Materials* (Vol. 409, pp. 402-405). Trans Tech Publications.
- [35] Avilés Lucas, P. (2004). Measurements and calculations of the radiation dose in patients undergoing Computed Tomography procedures.
- [36] Física Cuántica. “*Generacion rayos x*”. [Internet] Disponible en:
<https://edbar01.wordpress.com/tercer-corte/produccion-y-dispersion-de-rayos-x/> (Última visita 20/08/2016)
- [37] GE Oil & Gas. “*phoenix v/tome/x s*”. [Internet] Disponible en:
<https://www.gemeasurement.com/inspection-ndt/radiography-and-computed-tomography/phoenix-vtomex-s> (Última visita 16/06/2016)
- [38] Kutz, M. (Ed.). (2002). *Handbook of materials selection* (pp. 365-368). J. Wiley.
- [39] NIIR Board of Consultants and Engineers. (2007). *The Complete Technology Book on Aluminium And Aluminium Products*. Asia Pacific Business Press.

- [40] Ensayos de dureza. “*Dureza Vickers*”. [Internet] Disponible en:
<http://190.105.160.51/~material/materiales/presentaciones/ApunteDureza.pdf>
(Última visita 14/07/2016)
- [41] SlideShare. “*Centre Lathe Processes*”. [Internet] Disponible en:
<http://es.slideshare.net/stuartmeldrum/lathe-operations> (Última visita 16/06/2016)
- [42] Laser Focus World. “*Optical Surface Profiling*”. [Internet] Disponible en:
<http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-46/issue-1/features/optical-surface-profiling.html> (Última visita 14/06/2016)
- [43] Perfilómetro Óptico. “*Wyko NT1100 Optical Profiling System*”. [Internet]
Disponible en: <http://www.hull.ac.uk/ici/News/Wyko.pdf> (Última visita 21/07/2016)
- [44] Anderson Materials. “*Metallography and Metallographic Microscopy*”. [Internet]
Disponible en: http://www.andersonmaterials.com/metal_microscopy.html (Última visita 26/07/2016)
- [45] Microscopio Digital. “*Baty Vision System – Venture Touch*”. [Internet] Disponible en: <http://www.bowersgroup.co.uk/row/venture-touch-3030-baty-vision-systems-venture-touch.html> (Última visita 16/06/2016)
- [46] Durómetro. “*Digital FV-700*”. [Internet] Disponible en: http://www.ft-hardness.com/en/product/vickers_01.html (Última visita 16/06/2016)
- [47] FísicaLab. “*Teorema del seno*”. [Internet] Disponible en:
<https://www.fisicalab.com/apartado/teorema-seno-coseno-tangente#contenidos>
(Última visita 20/07/2016)
- [48] GE Inspection. “*Industrial Process Control with Computed Tomography (CT)*”. [Internet] Disponible en: <http://www.slideshare.net/GEInspectionTech/ge-inspection-industrial-process-control-with-computed-tomography-ct> (Última visita 20/08/2016)

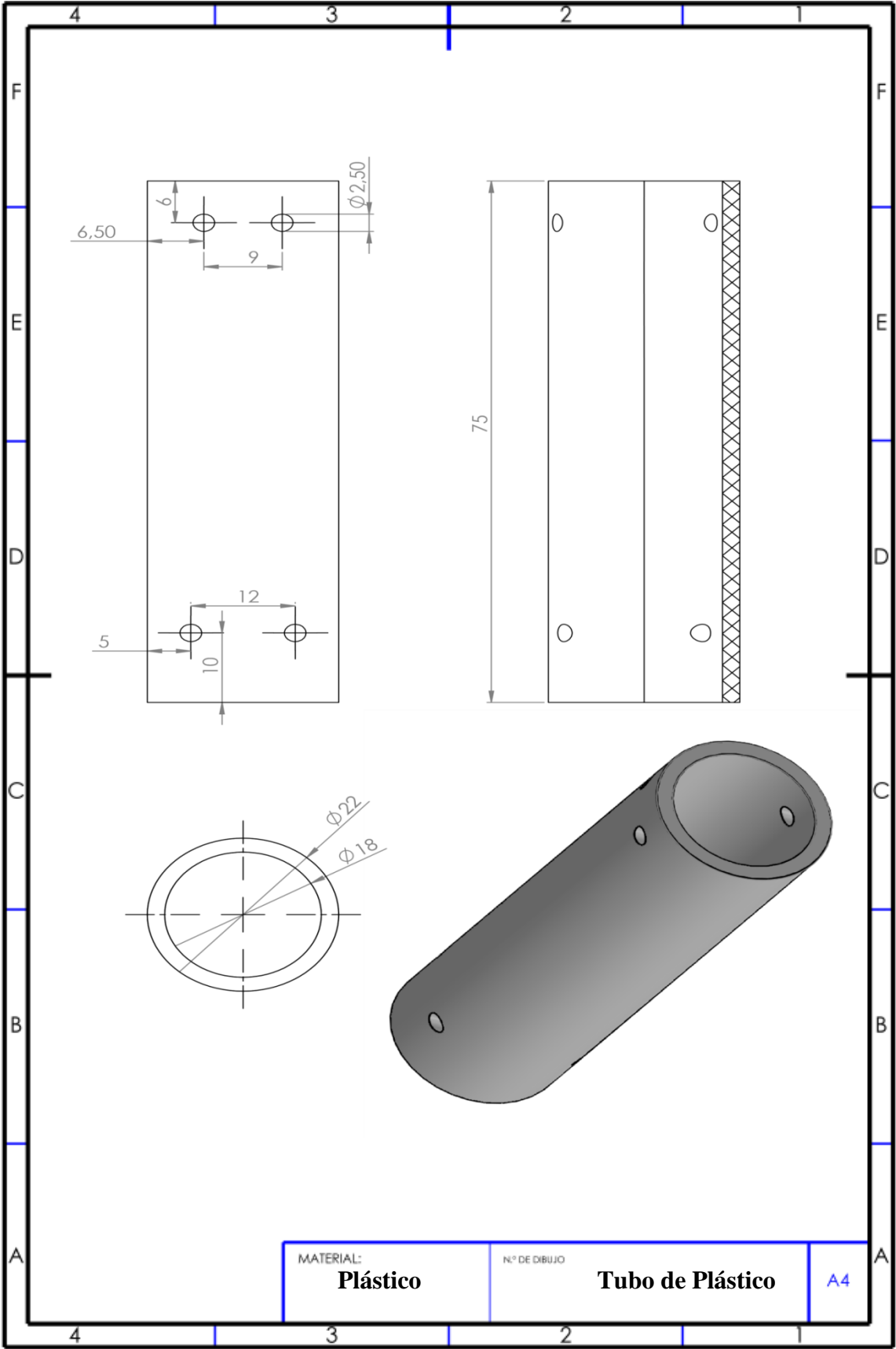
[49] Imagenología. “*Histograma*”. [Internet] Disponible en:

<http://imagenologia.robustiana.com/22-procesamiento-y-manipulaci%C3%B3n-de-una-imagen-radiogr%C3%A1fica-digital> (Última visita 15/05/2016)

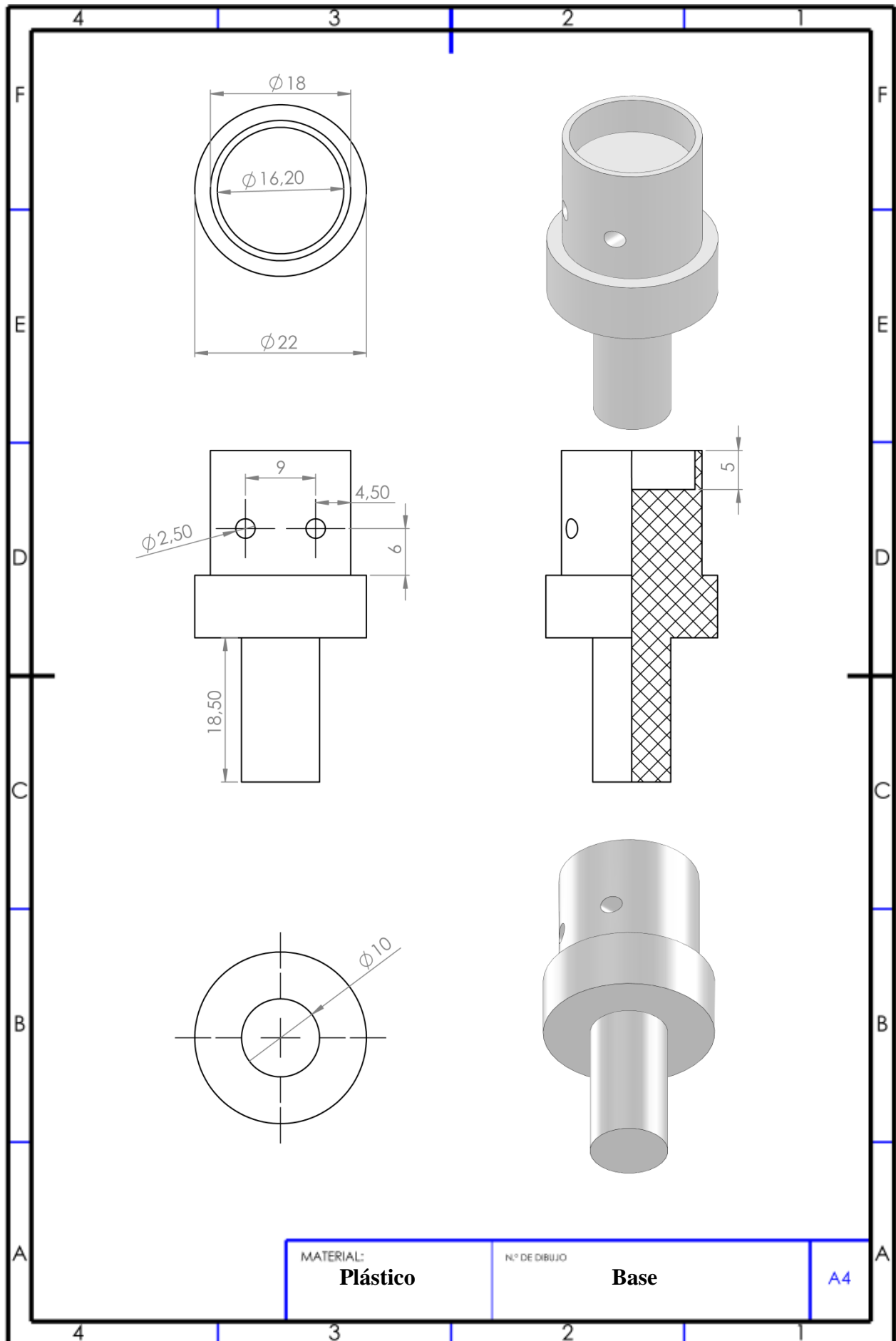
[50] Impresora 3D. “*Up! 3D Plus2*”. [Internet] Disponible en:

<https://www.up3d.com/?r=plus> (Última visita 16/06/2016)

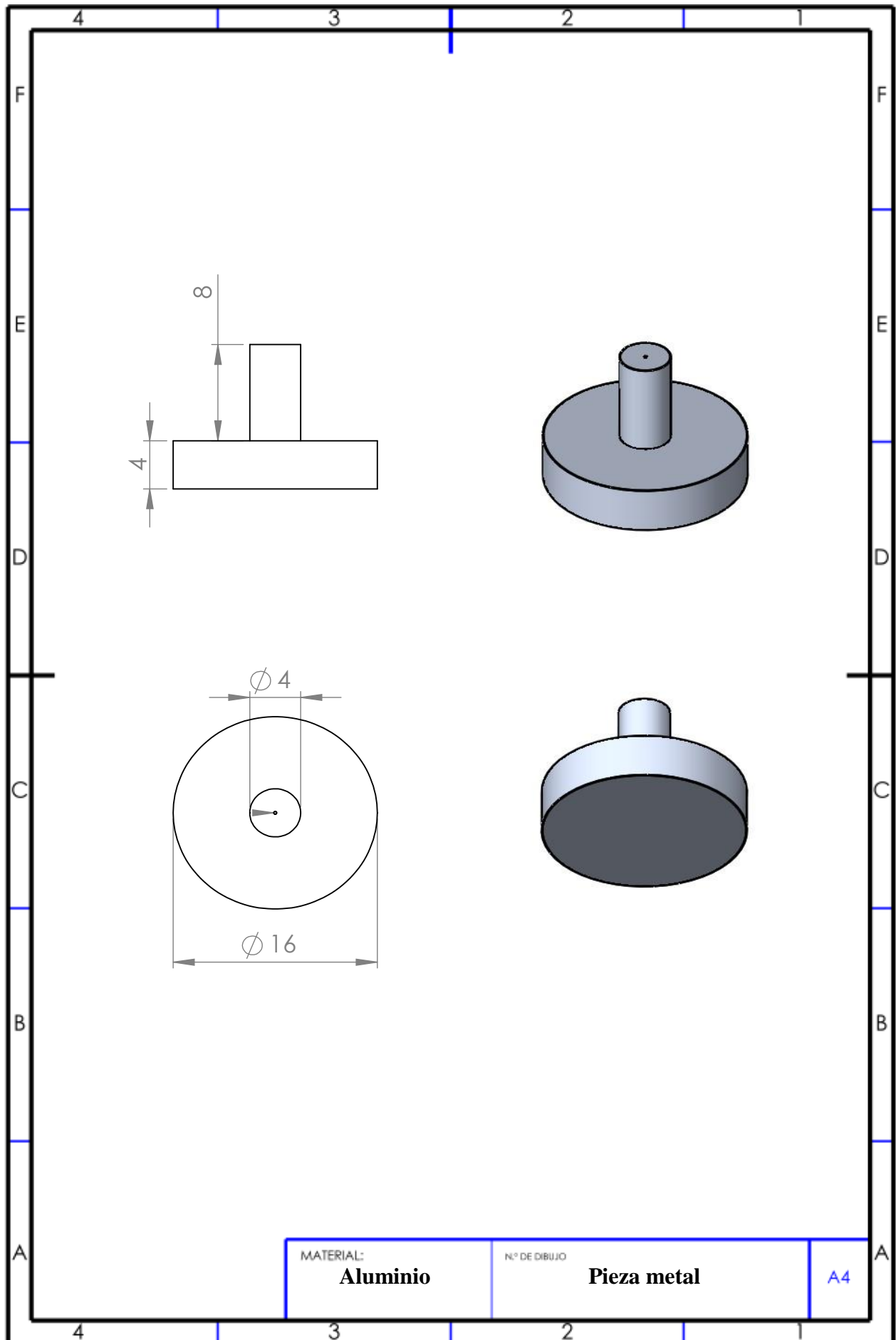
ANEXO A: PLANOS



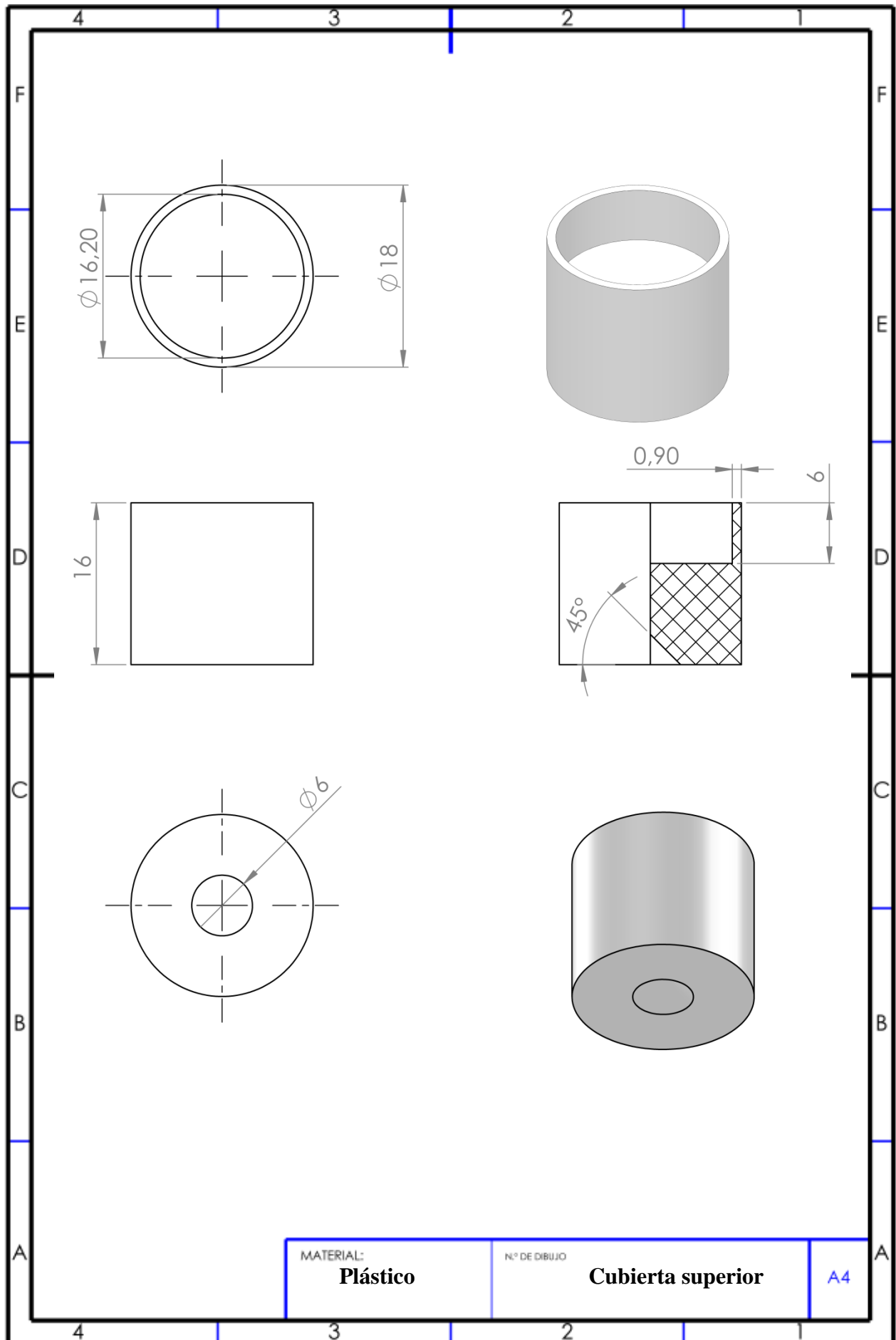
ANEXO A: PLANOS SOPORTE



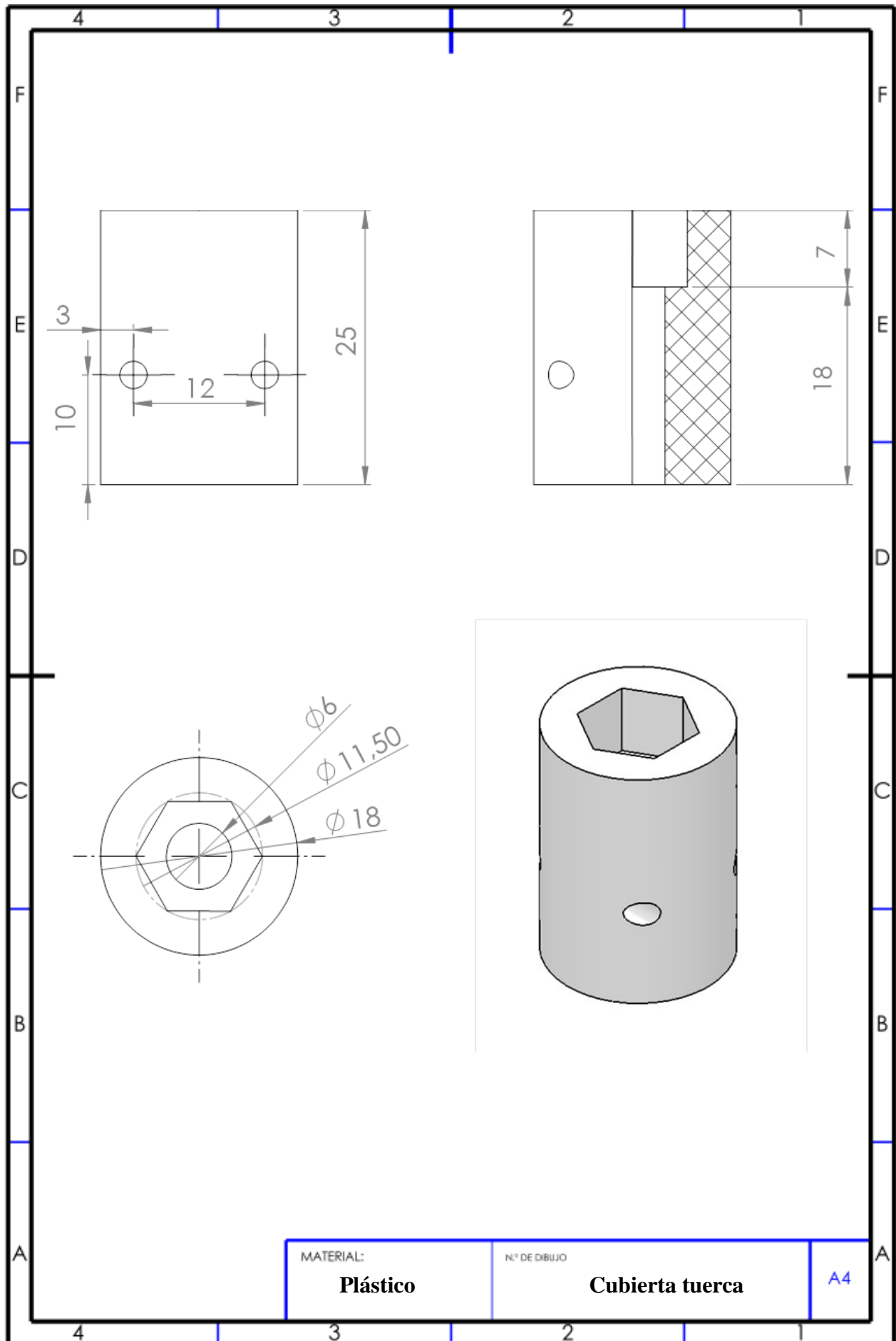
ANEXO A: PLANOS SOPORTE



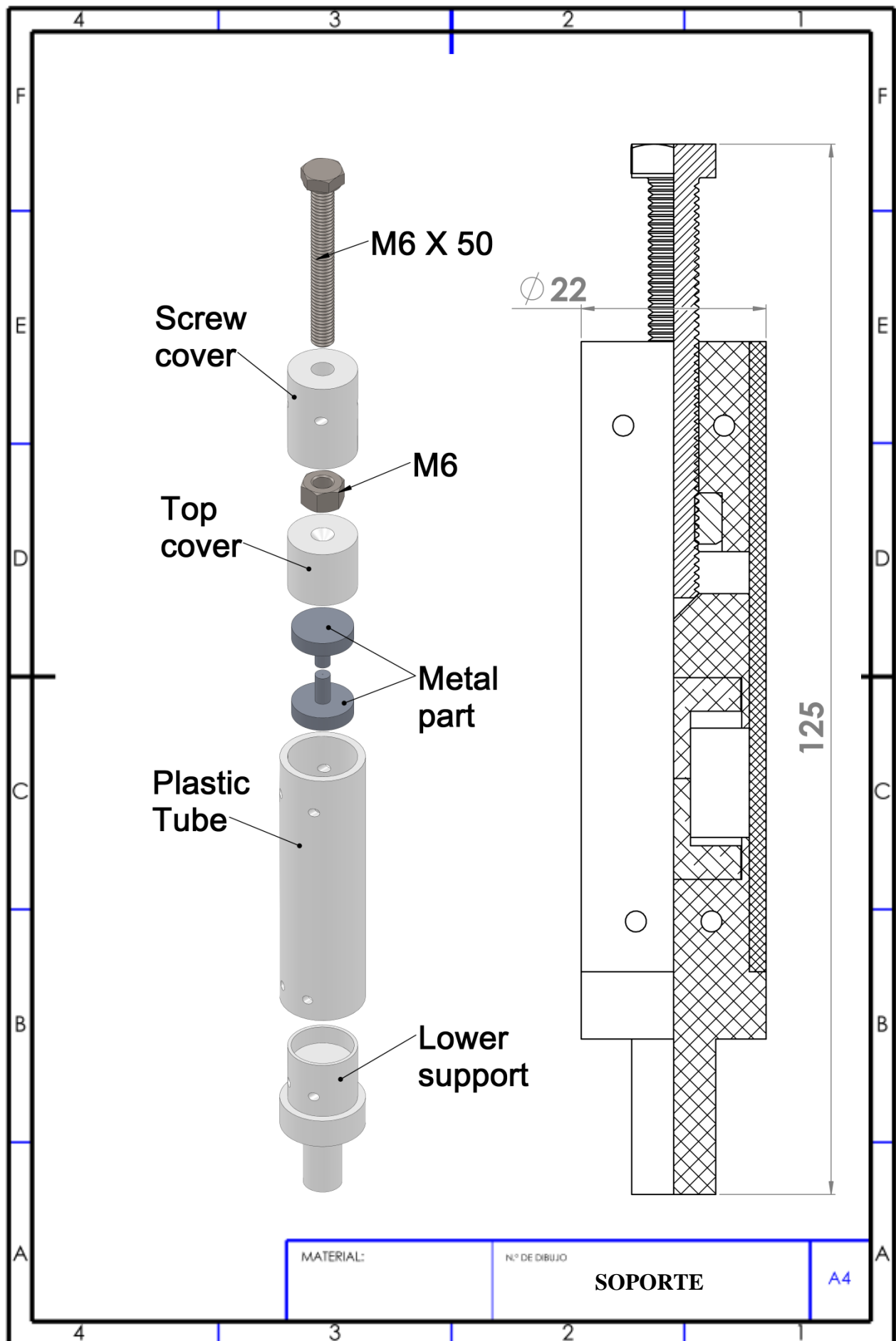
ANEXO A: PLANOS SOPORTE



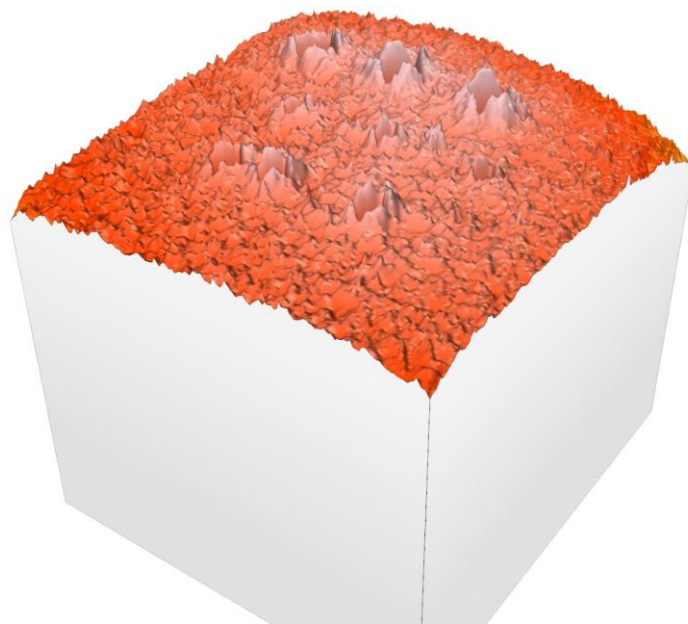
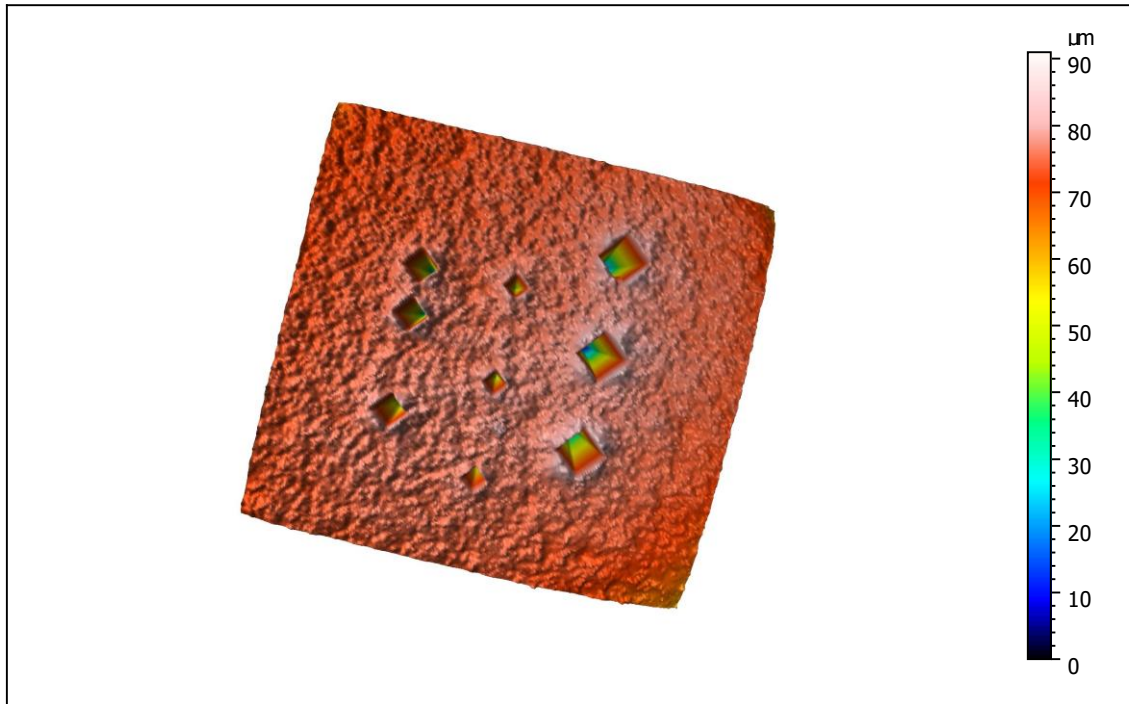
ANEXO A: PLANOS SOPORTE



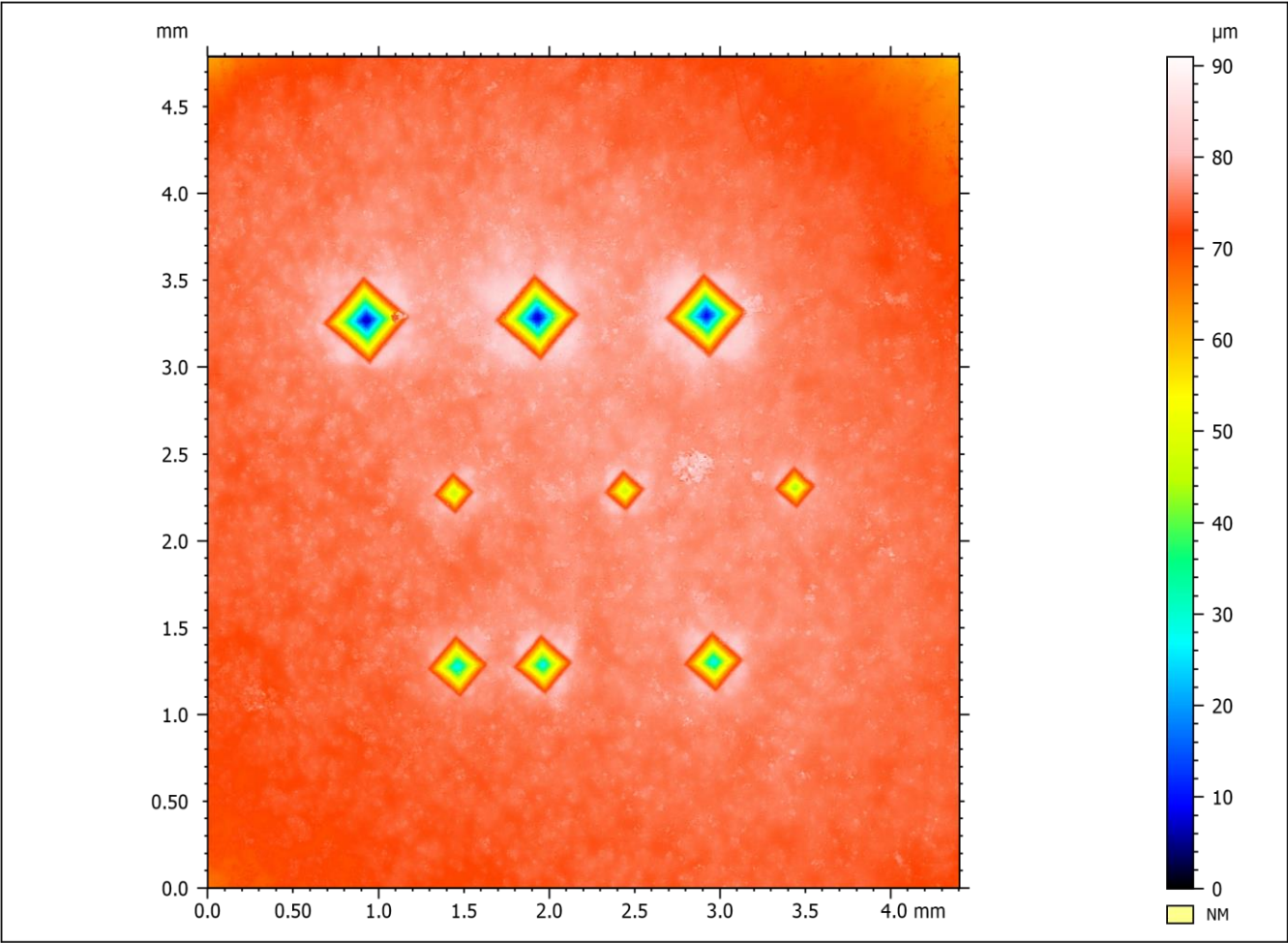
ANEXO A: PLANOS SOPORTE



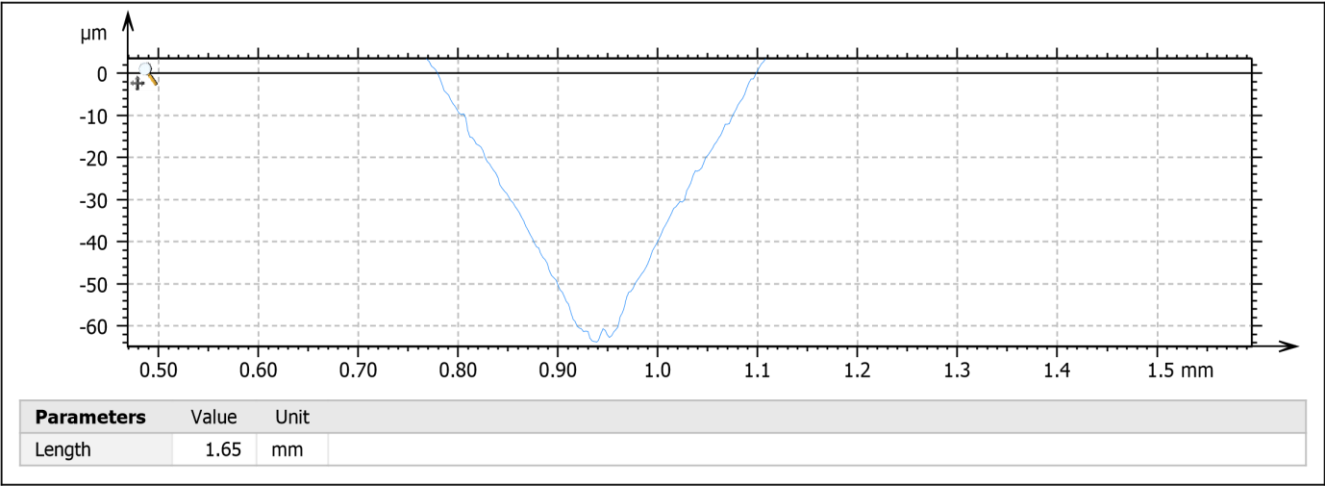
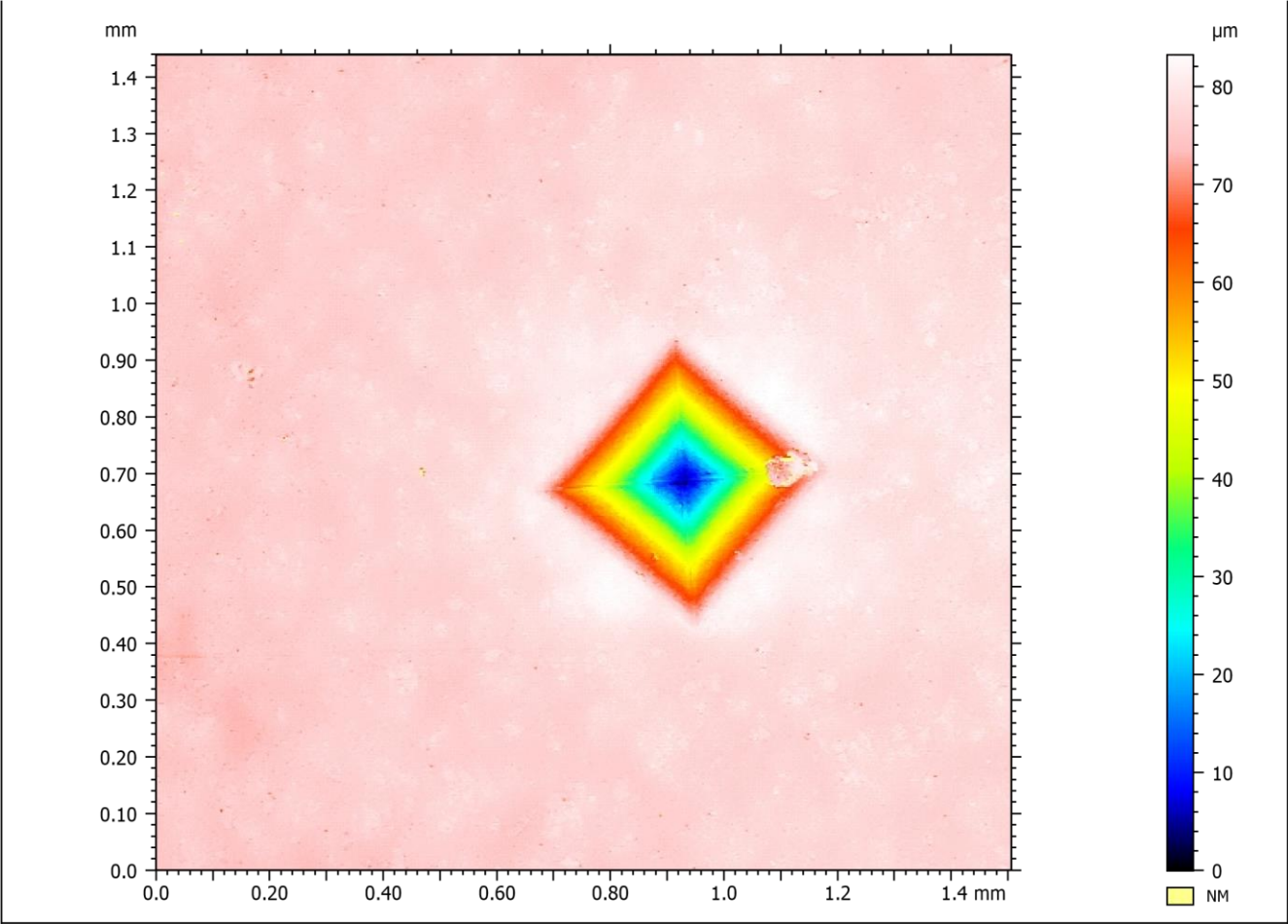
ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS



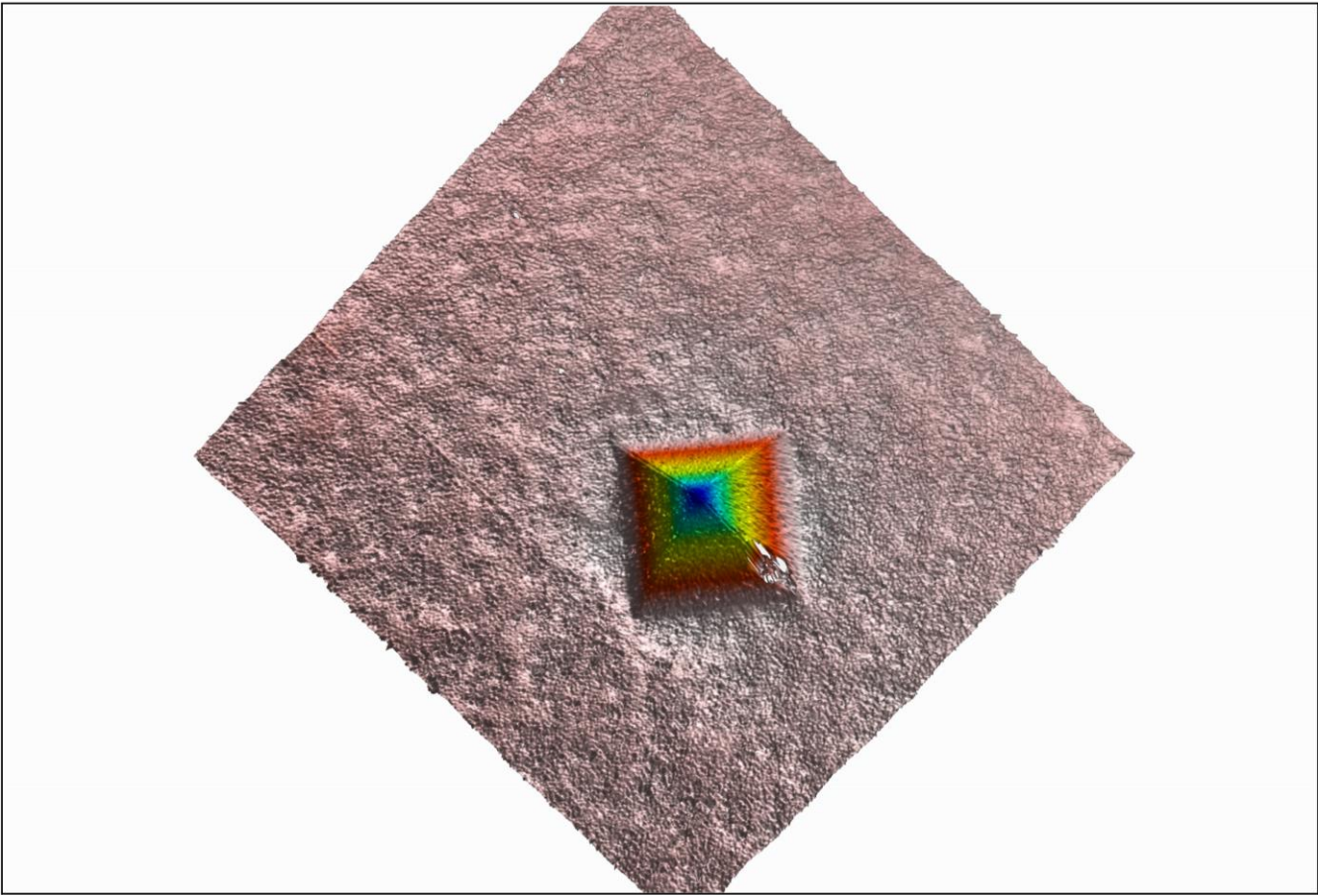
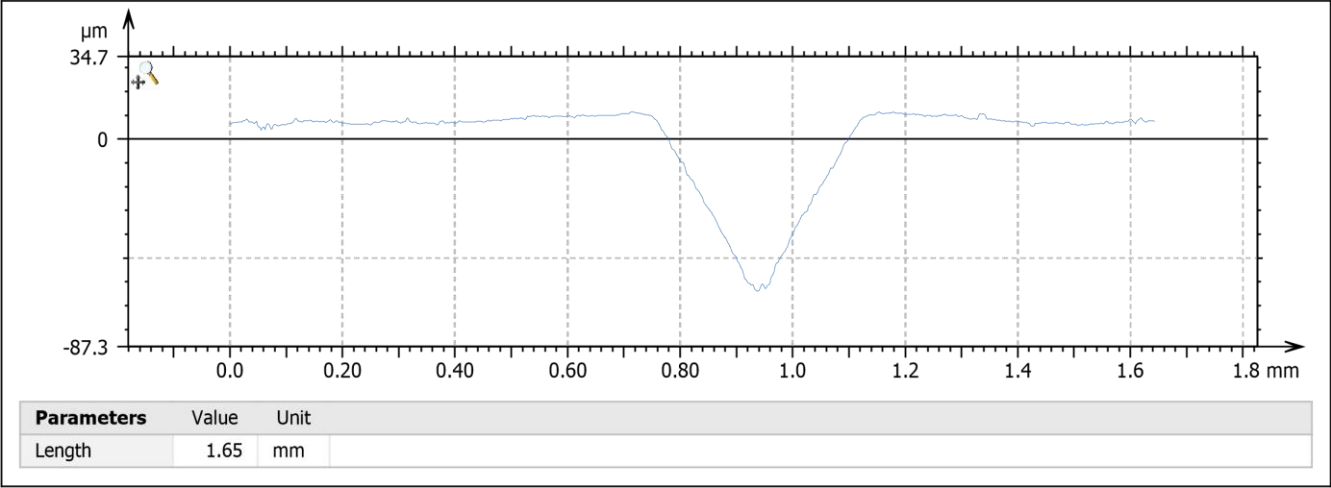
ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS (PERFILÓMETRO)



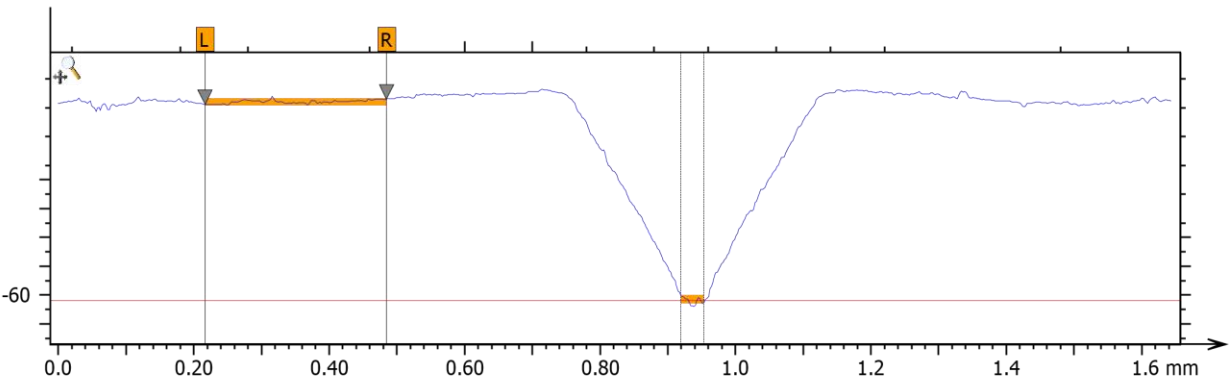
PORO G3



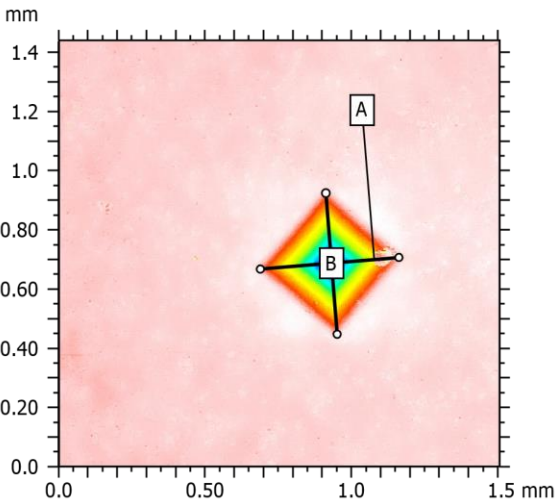
ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS (PERFILÓMETRO)



ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS (PERFILÓMETRO)

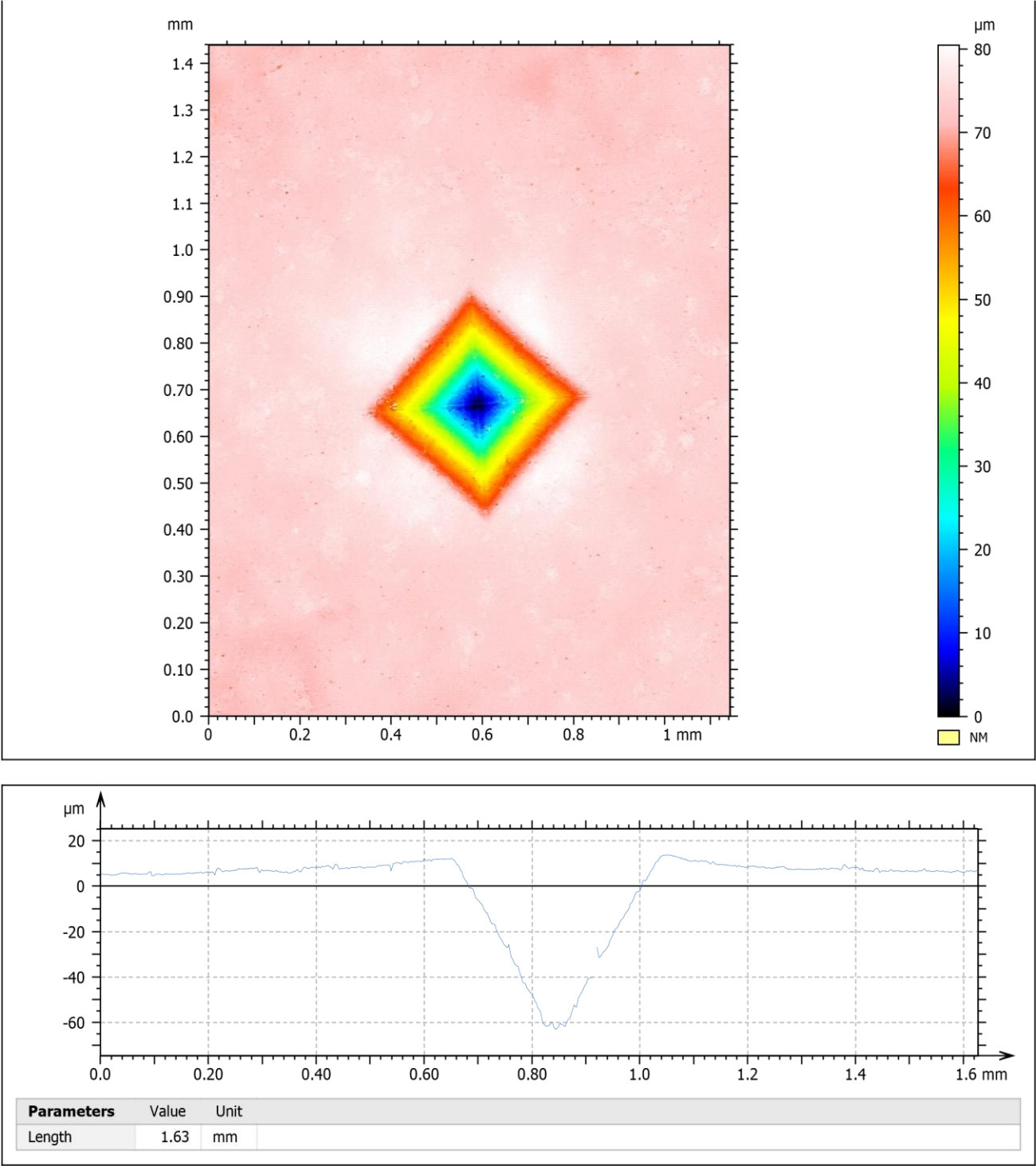


Parameters	Step 1	Unit
Width	0.271	mm
Maximum height	70.8	μm
Mean height	68.9	μm

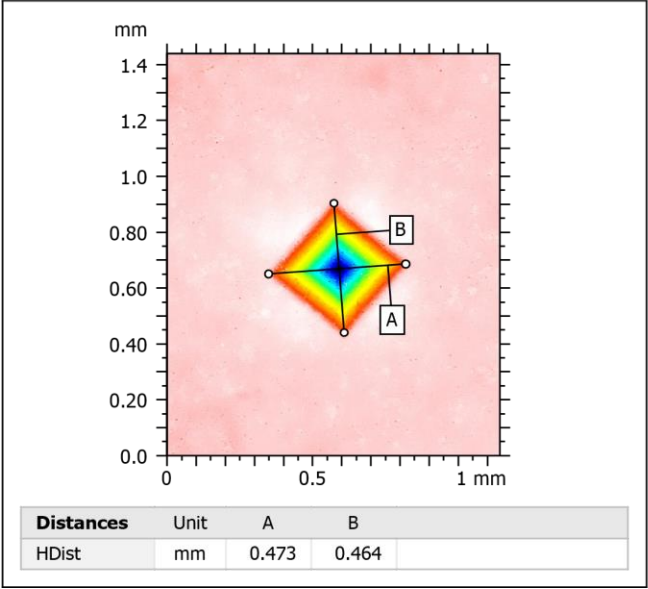
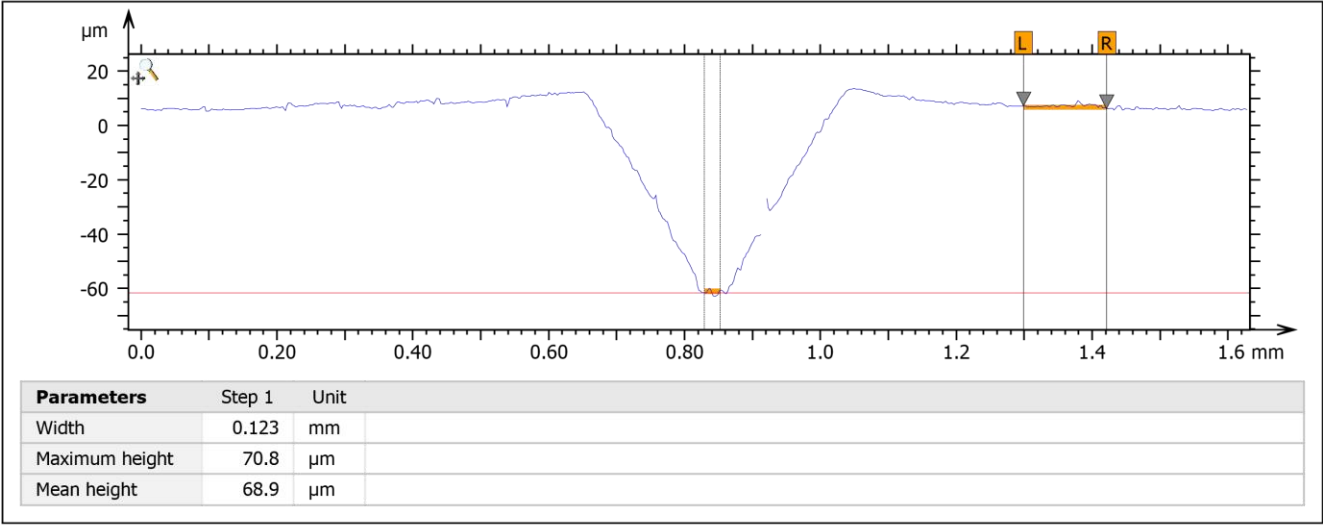
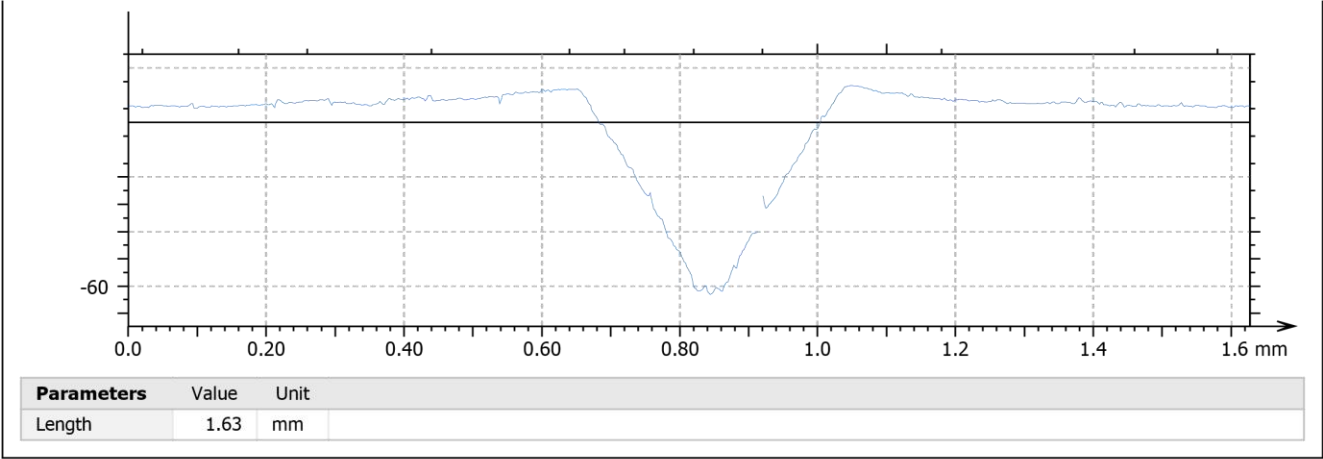


Distances	Unit	A	B
HDist	mm	0.475	0.478

PORO G2

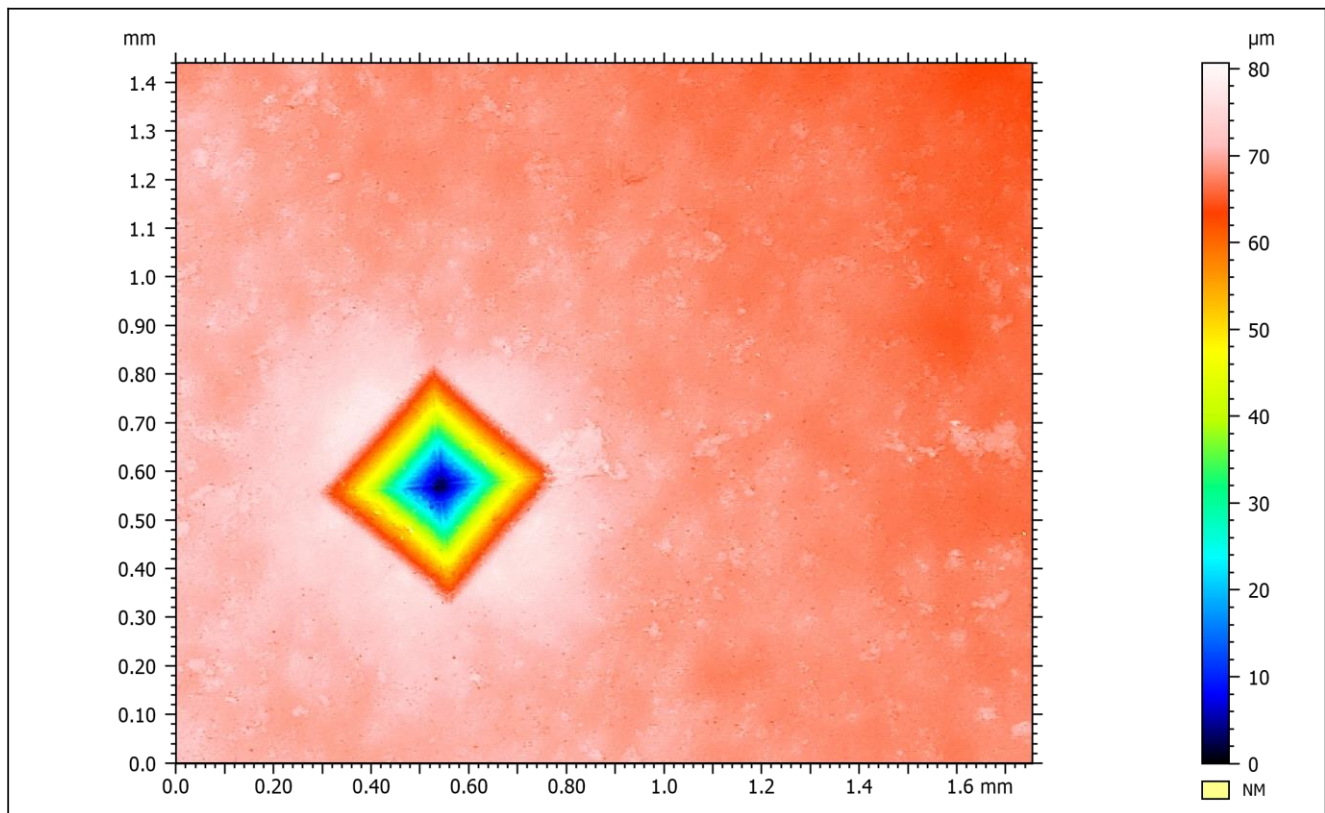
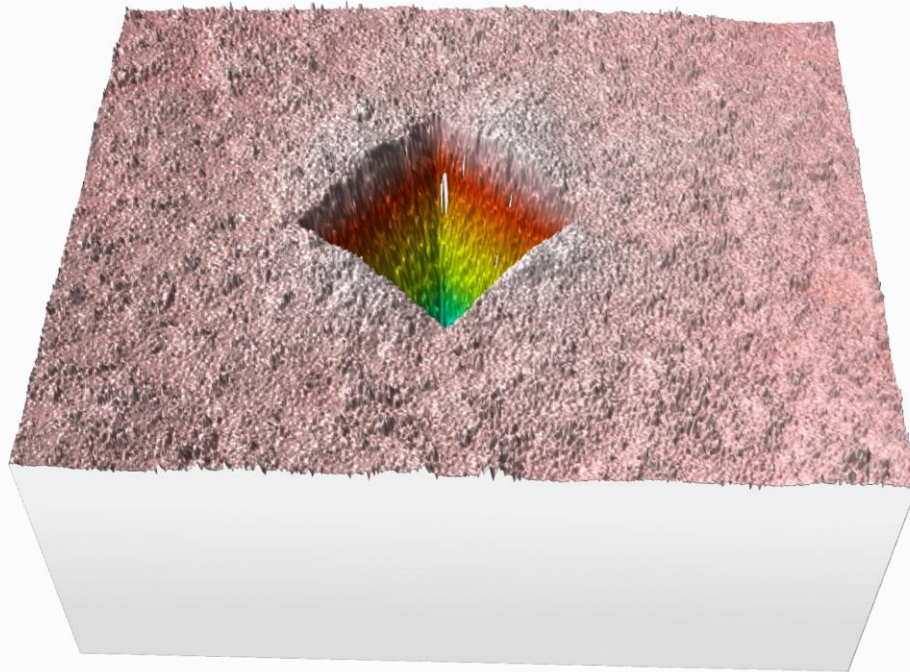


ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS (PERFILÓMETRO)

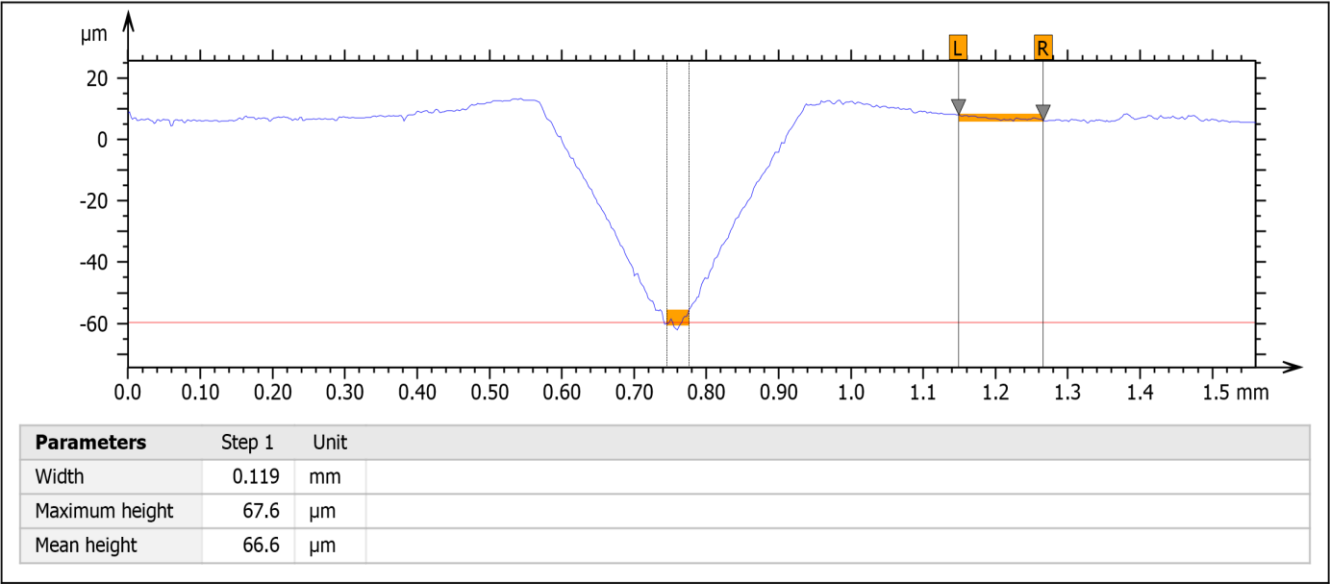
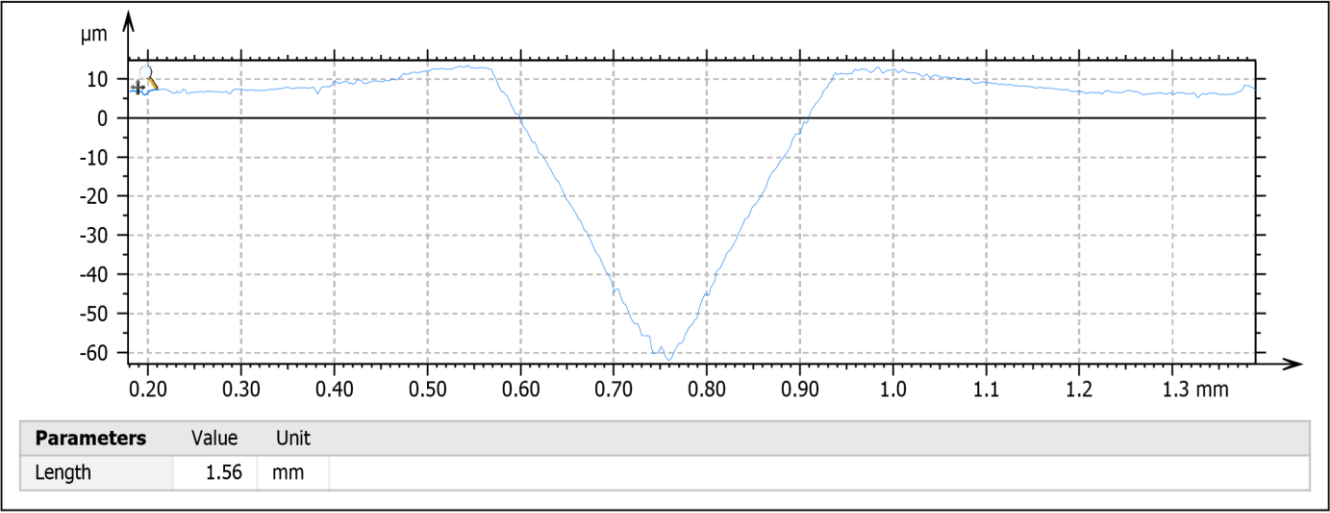


ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS (PERFILÓMETRO)

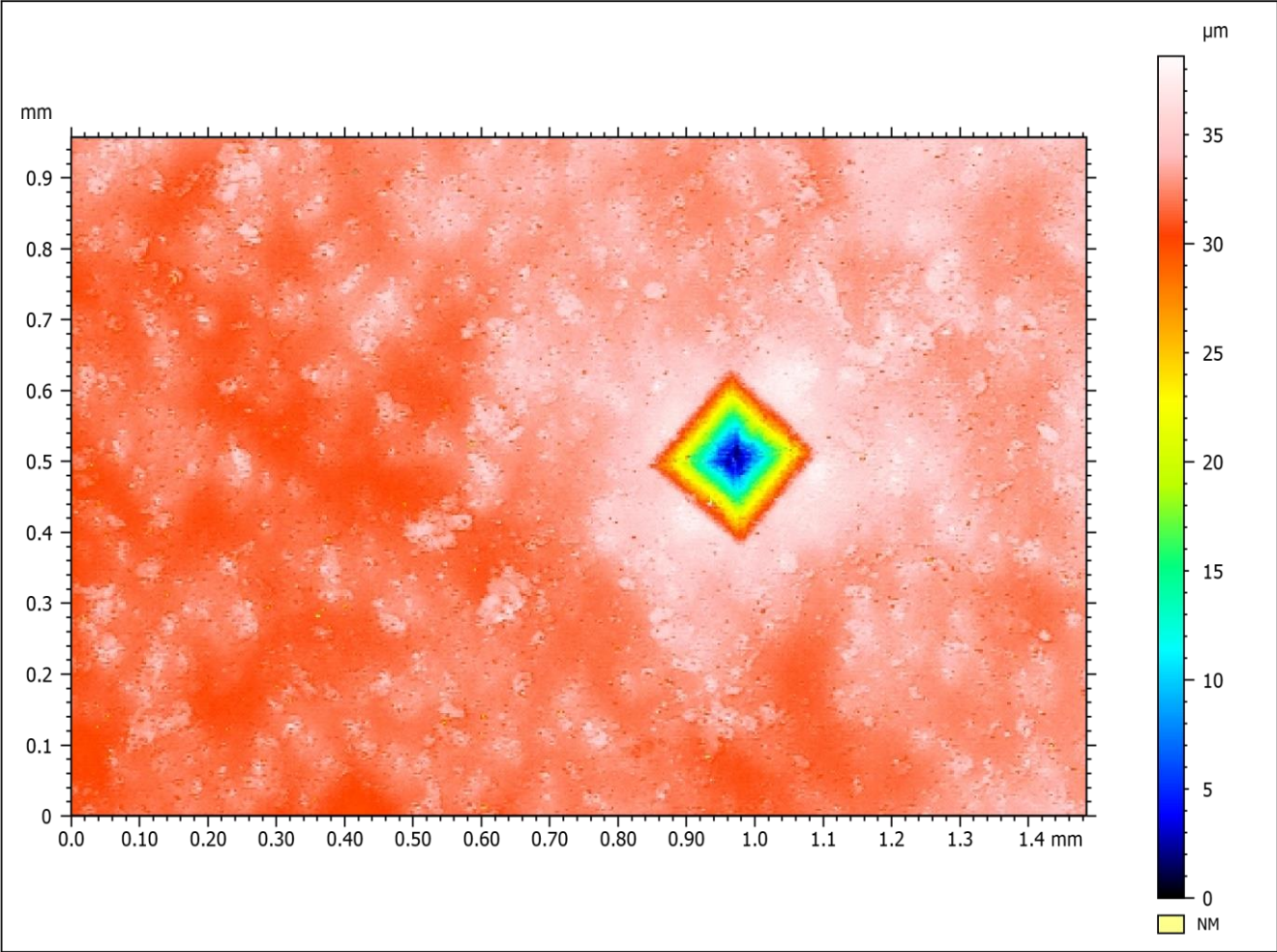
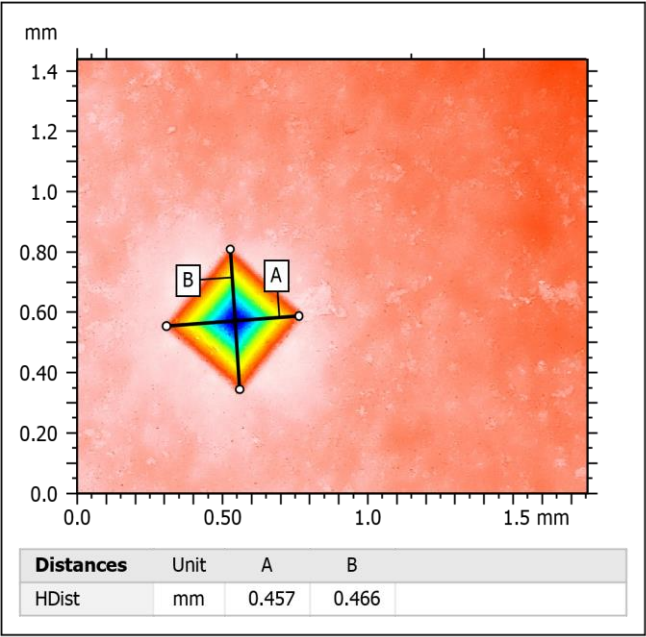
PORO G1



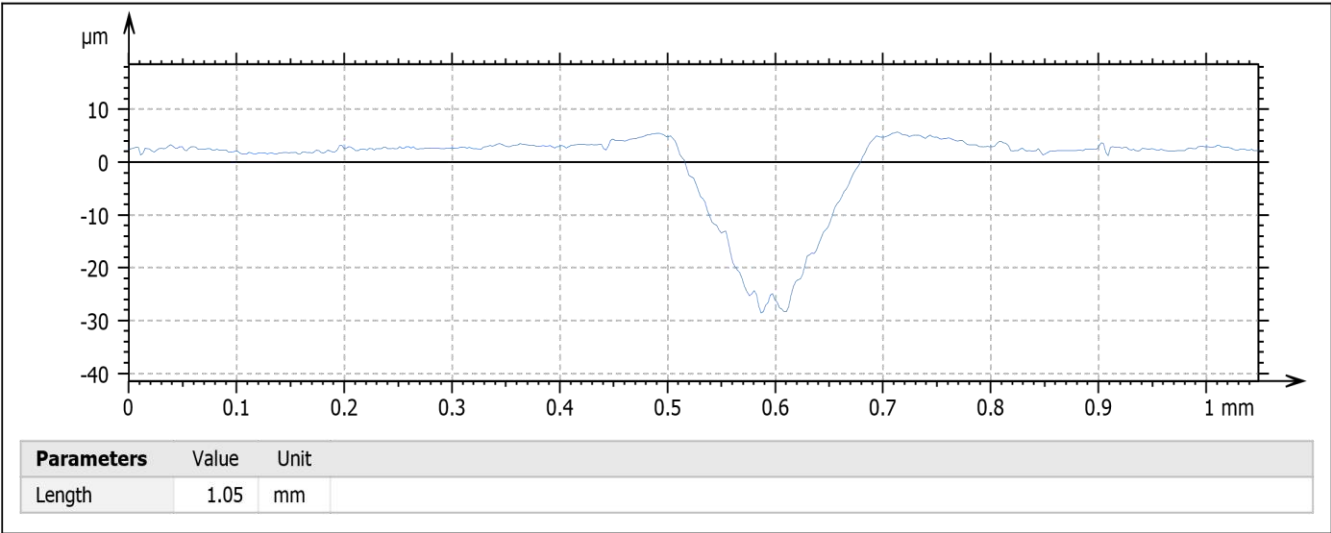
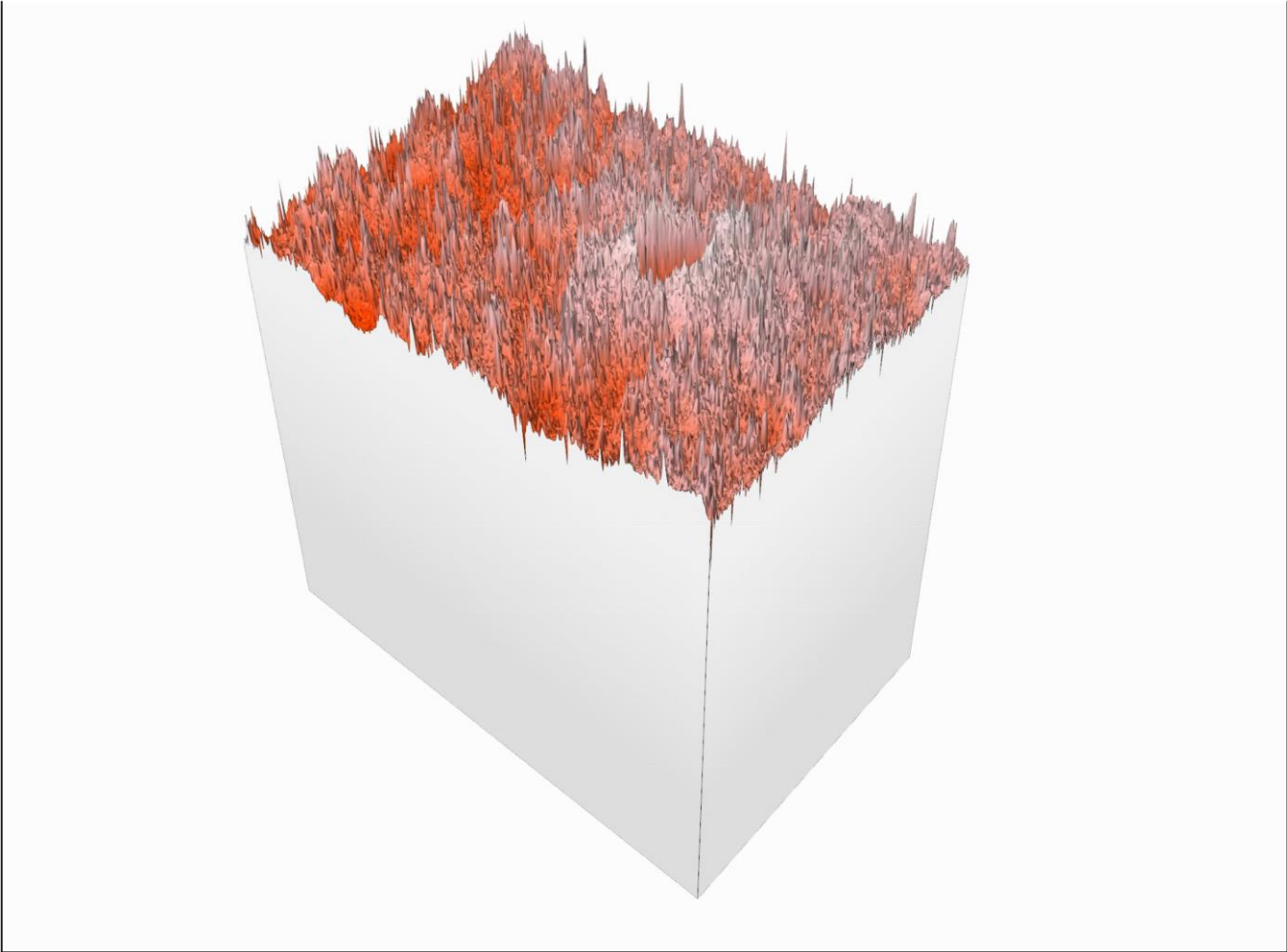
ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS (PERFILÓMETRO)



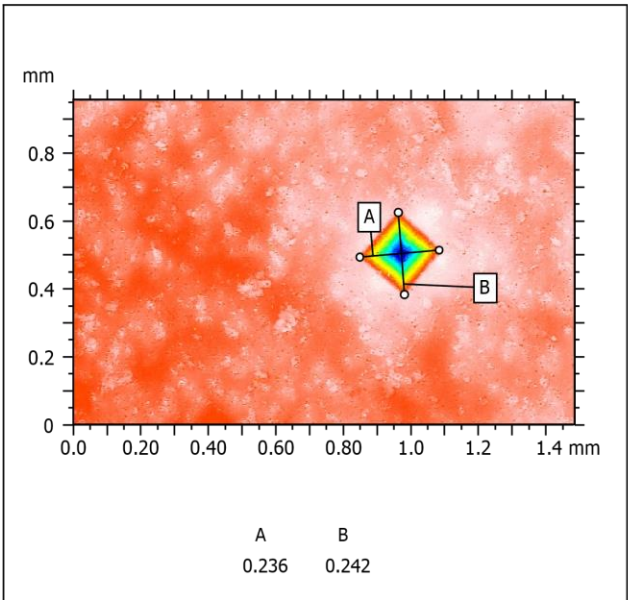
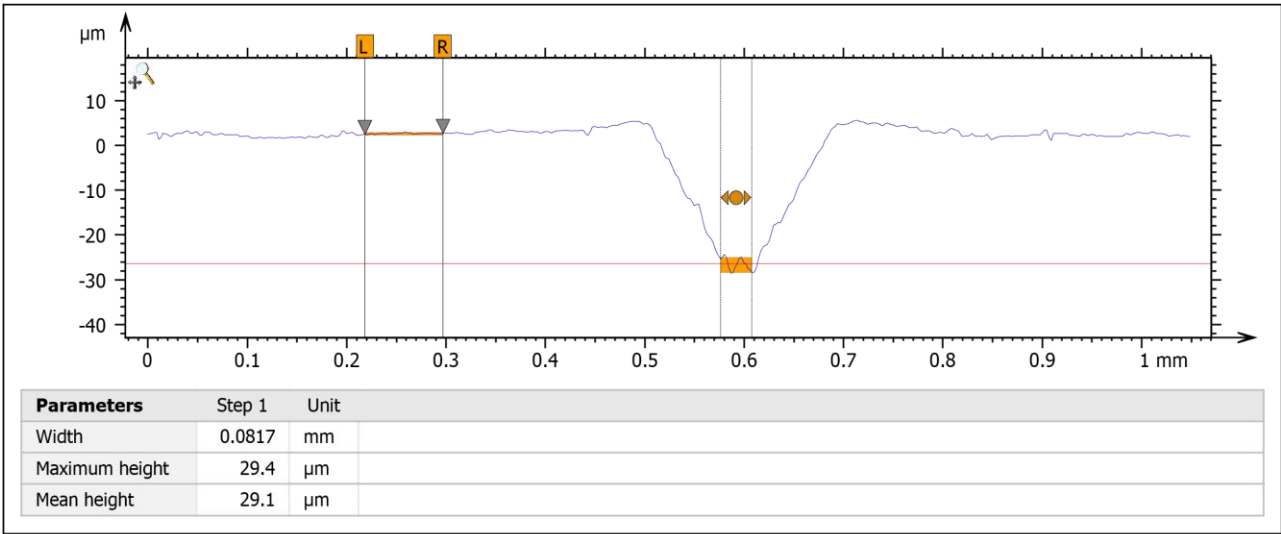
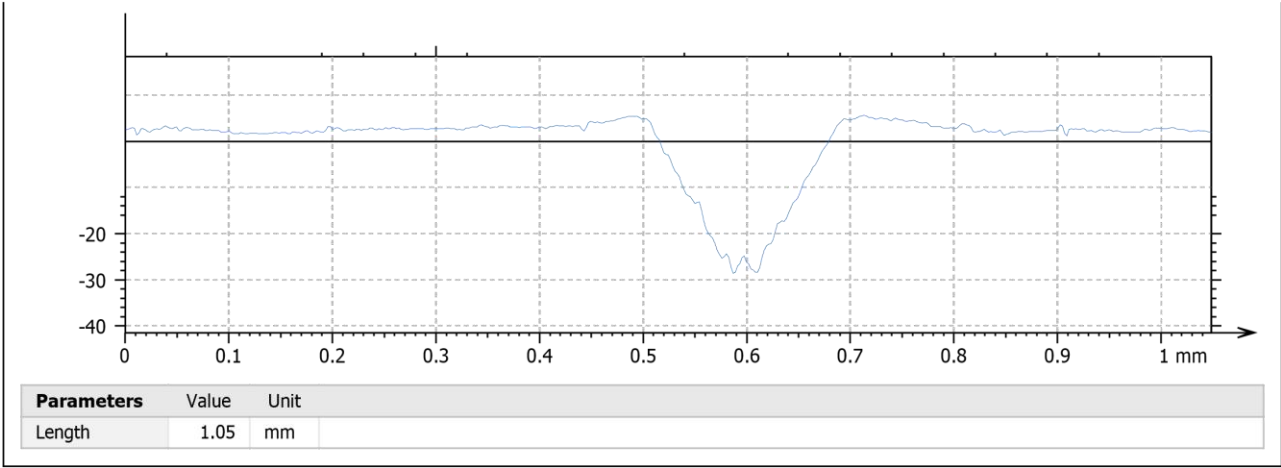
ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS (PERFILÓMETRO)



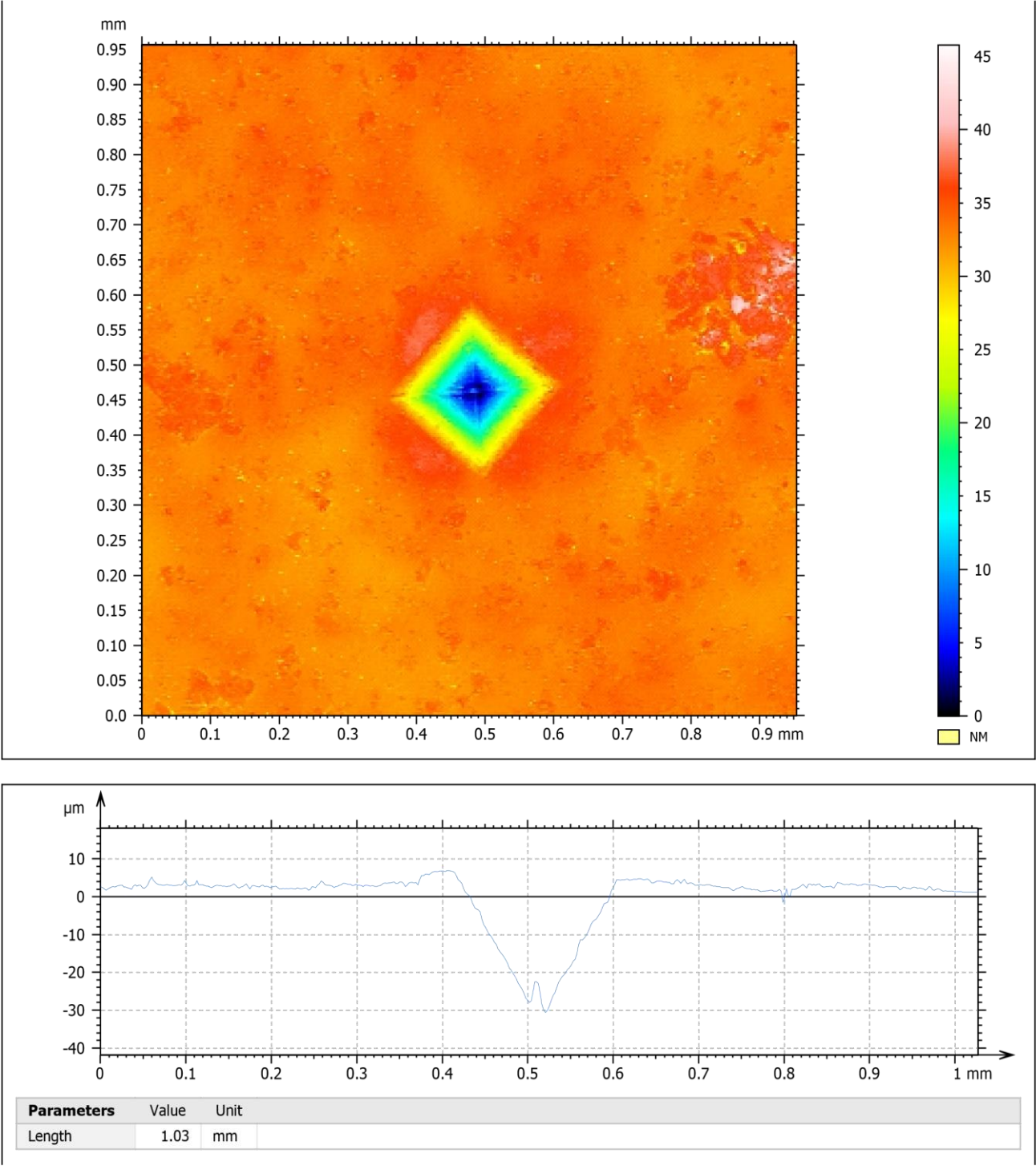
PORO P3



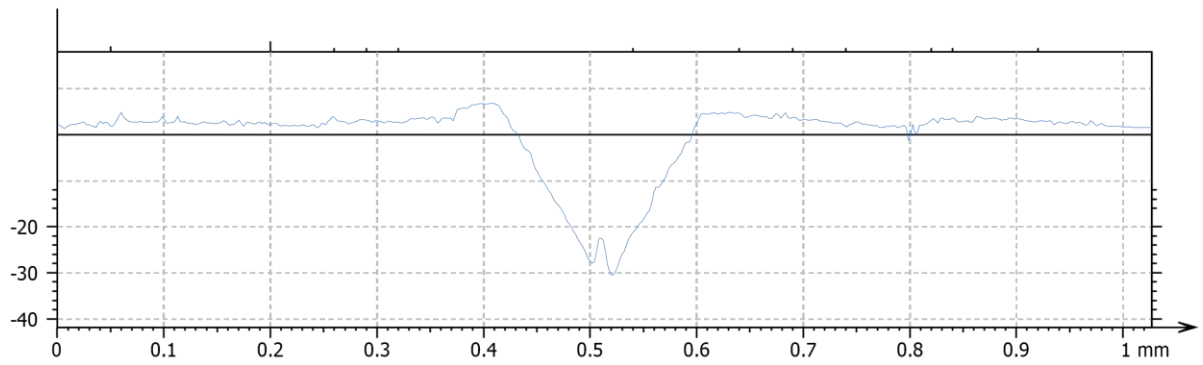
ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS (PERFILÓMETRO)



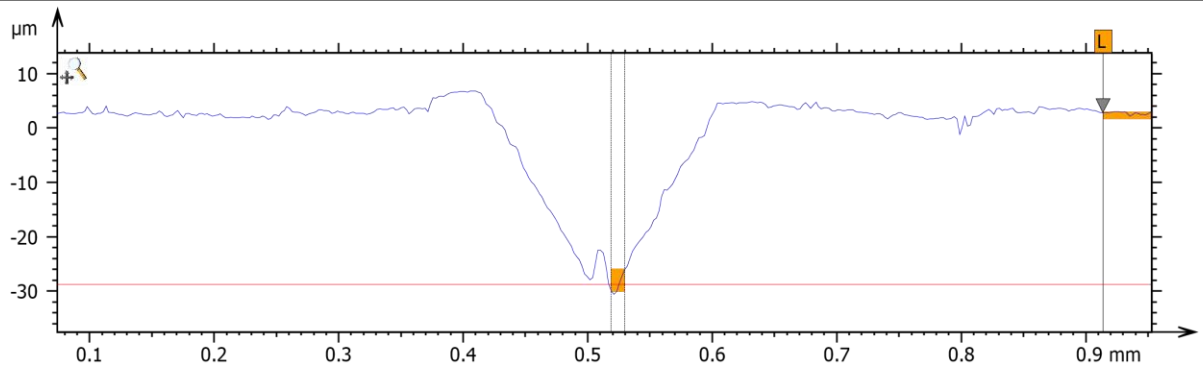
PORO P2



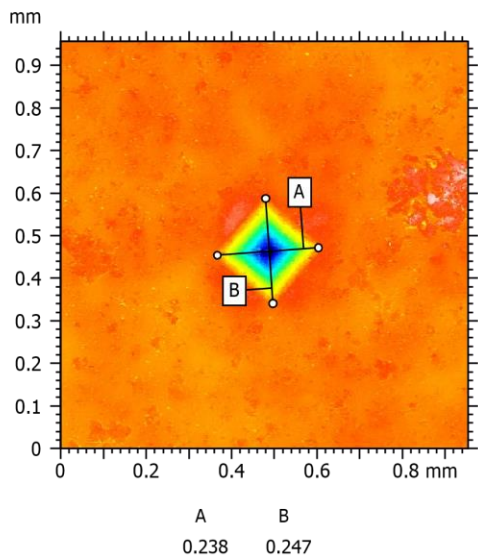
ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS (PERFILÓMETRO)



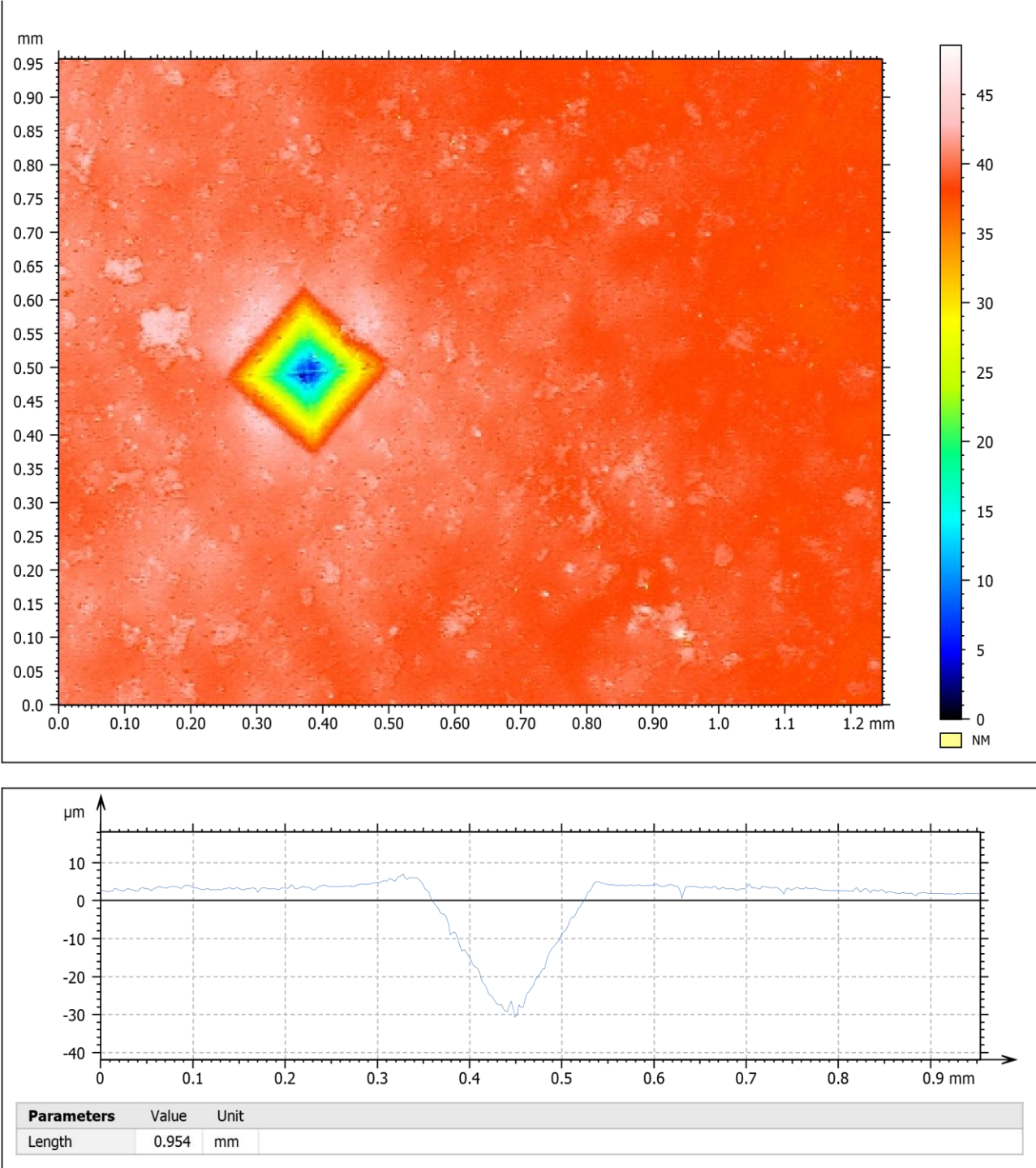
Parameters	Value	Unit
Length	1.03	mm



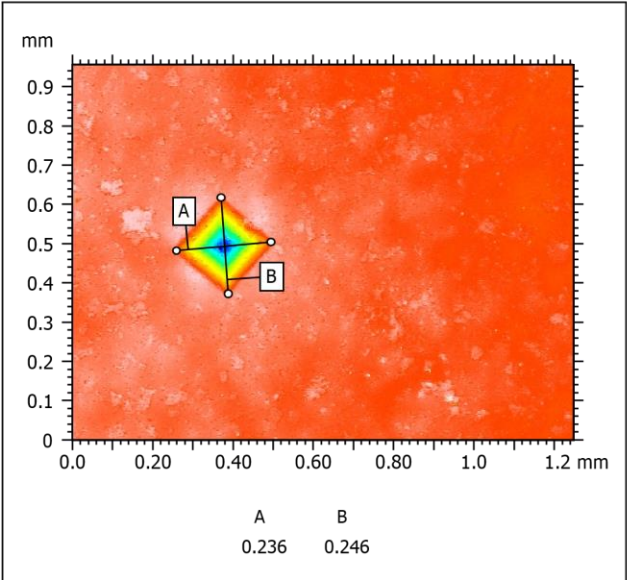
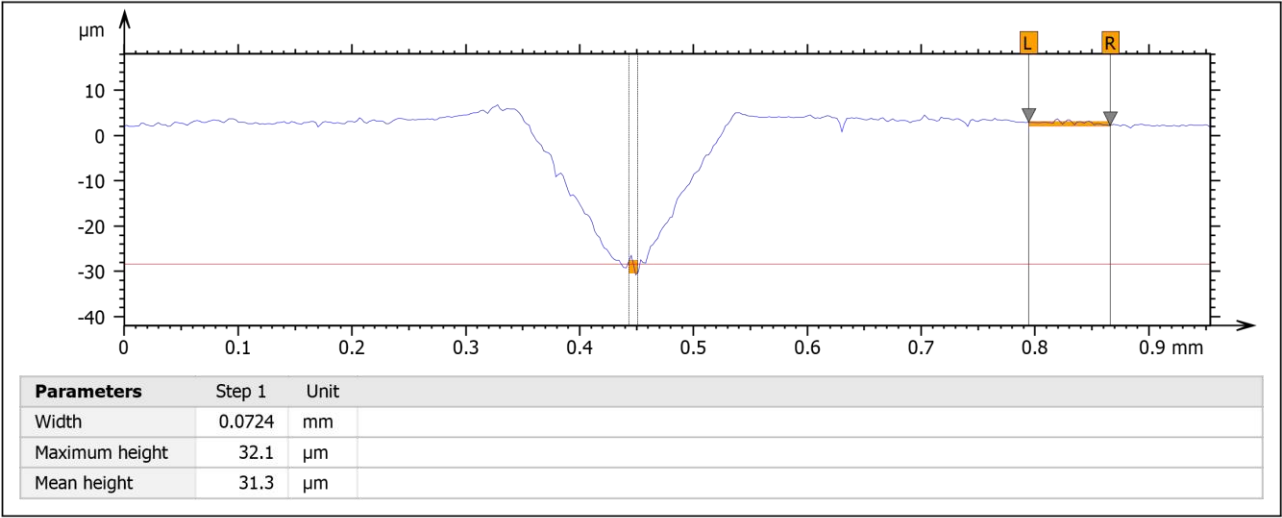
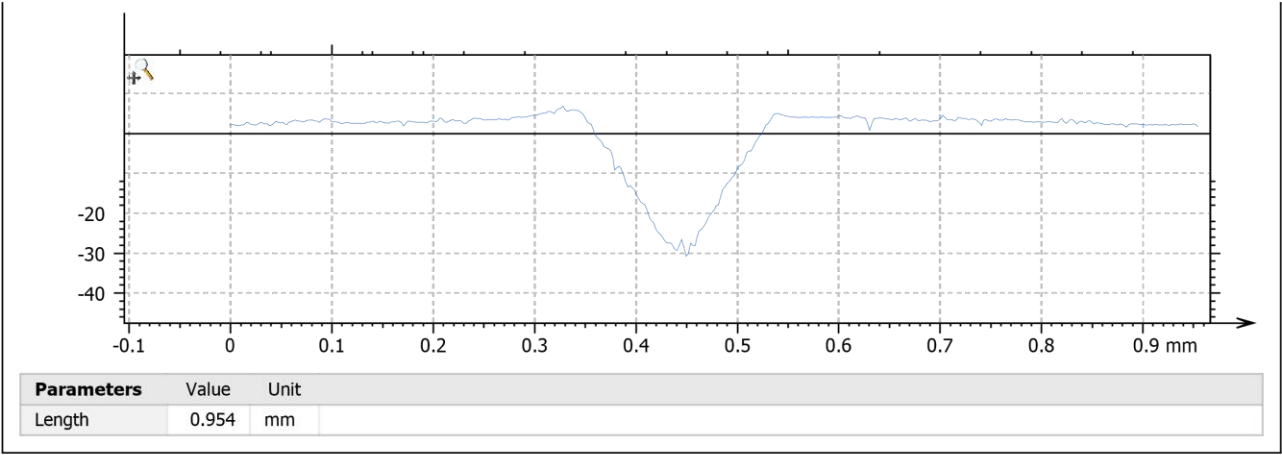
Parameters	Step 1	Unit
Width	0.0811	mm
Maximum height	31.8	μm
Mean height	31.3	μm



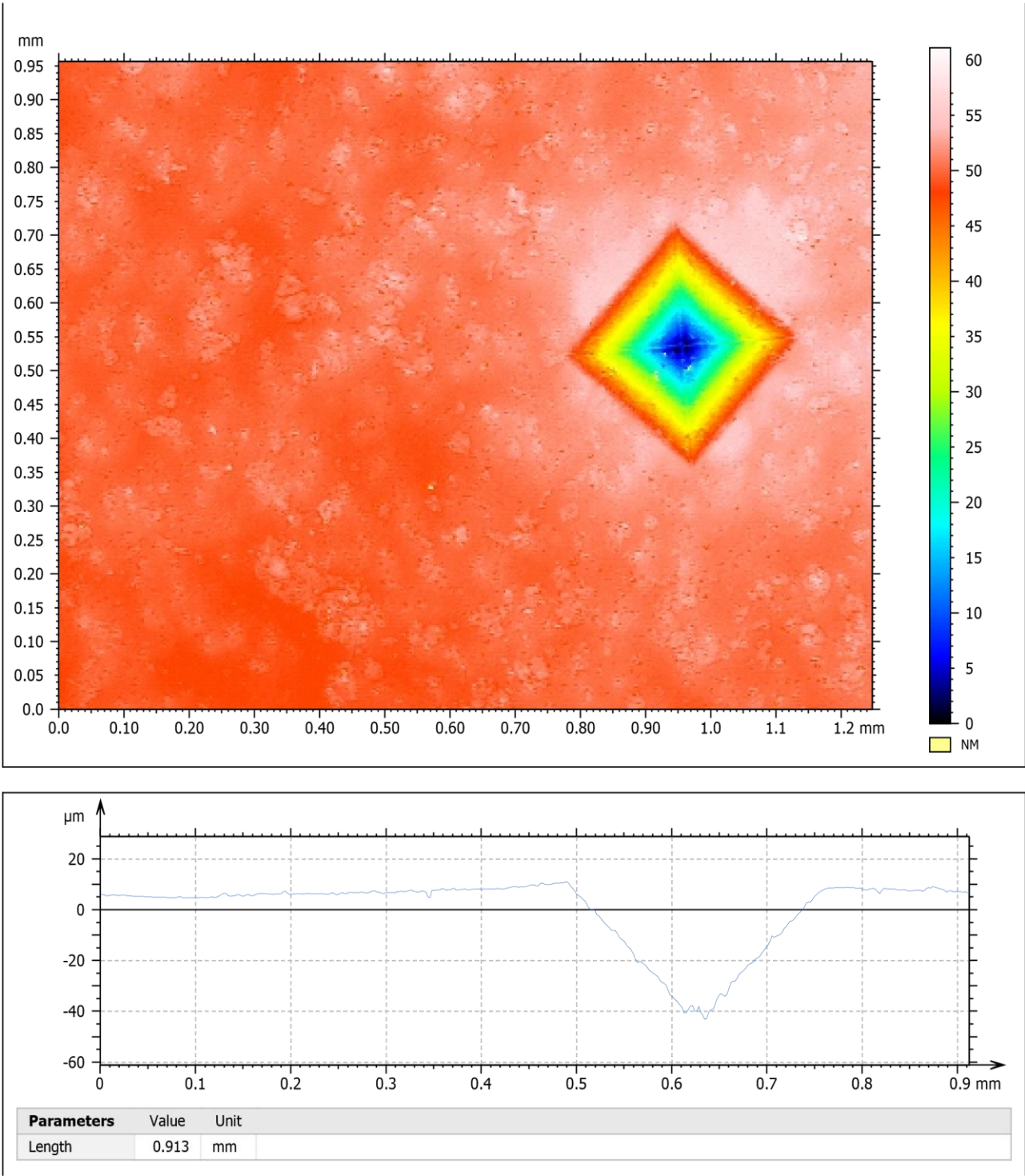
PORO P1



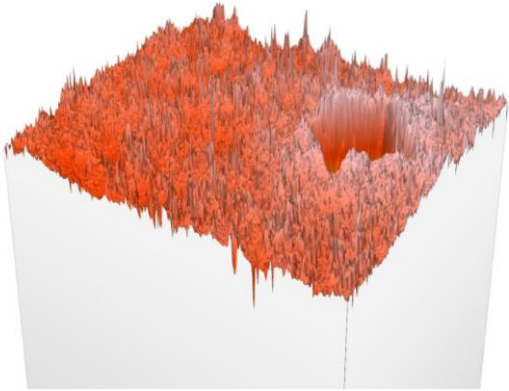
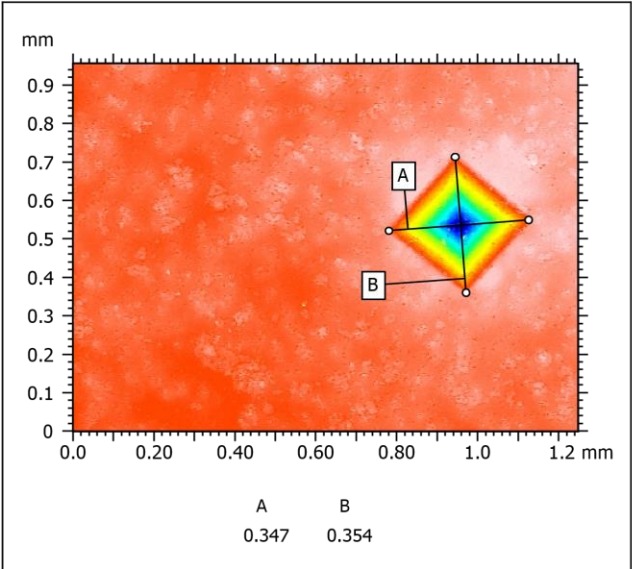
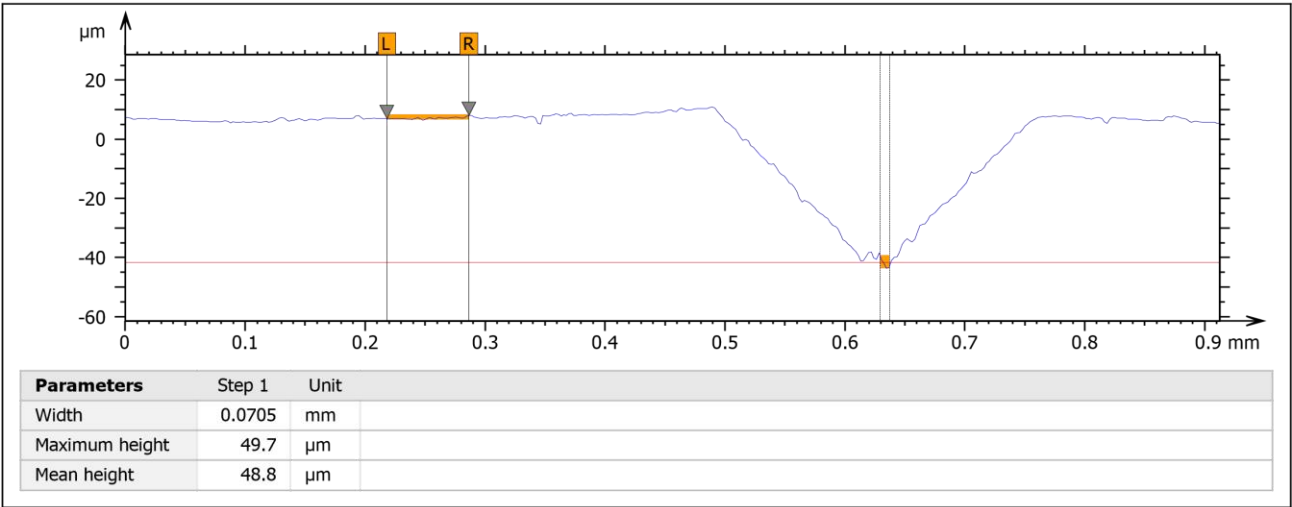
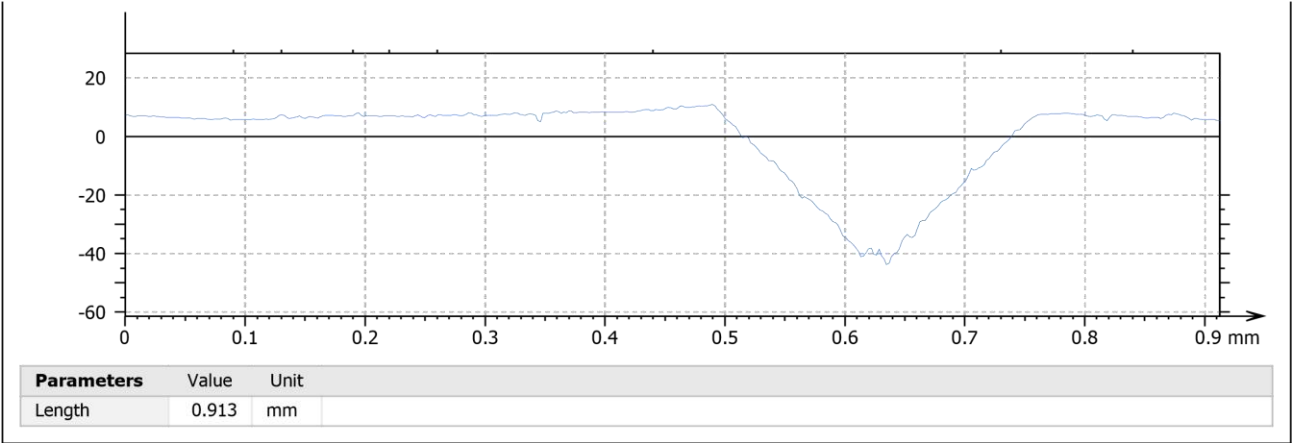
ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS (PERFILÓMETRO)



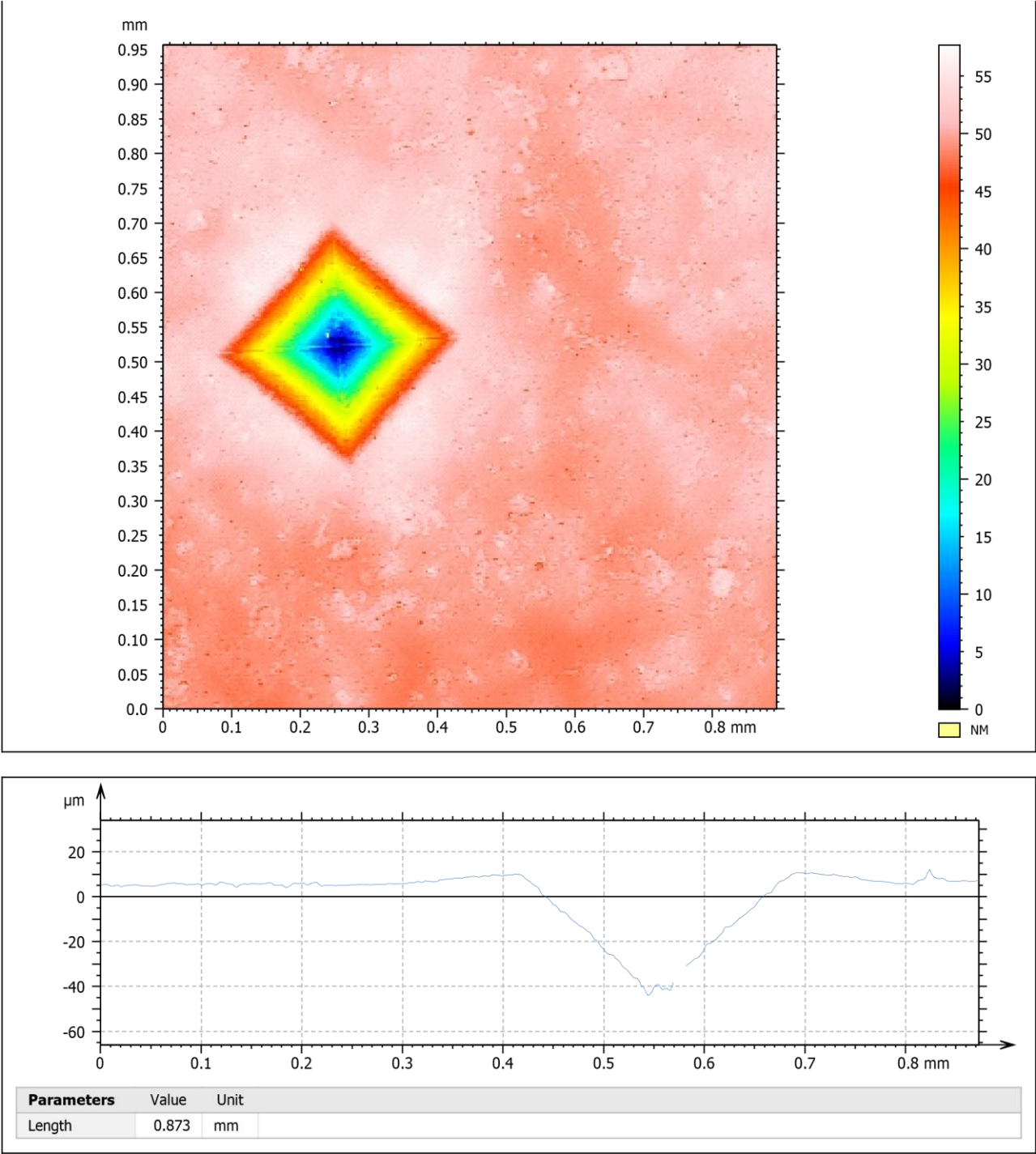
PORO M3



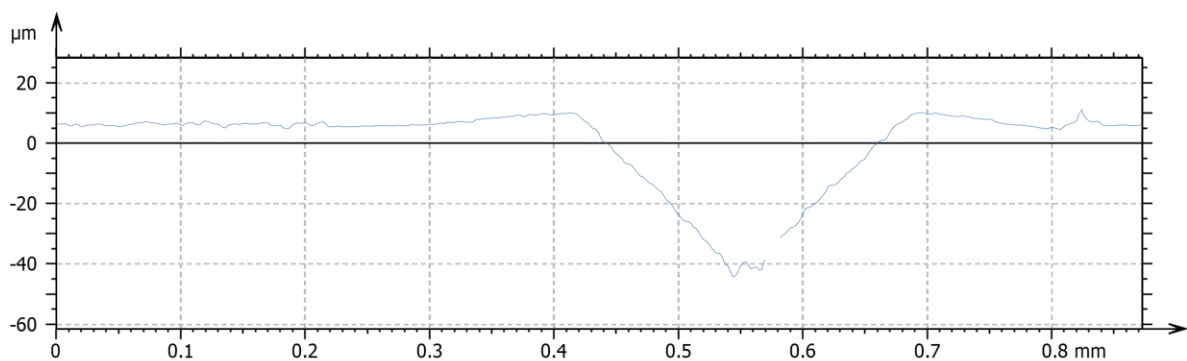
ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS (PERFILÓMETRO)



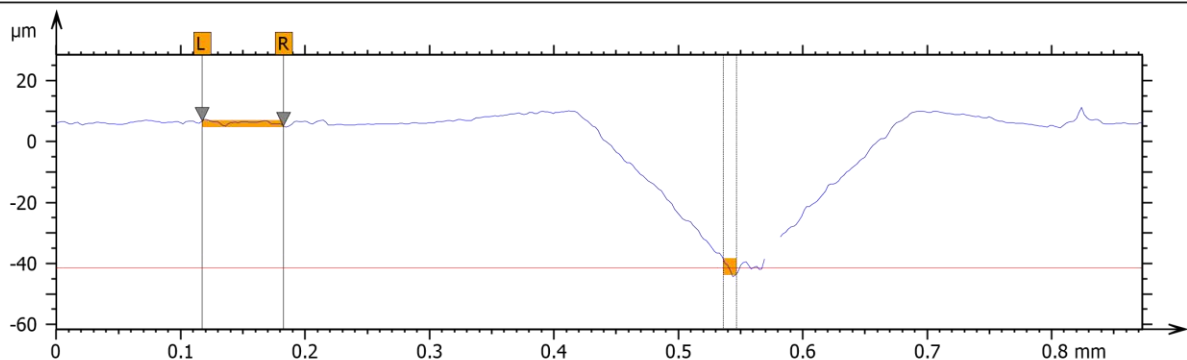
PORO M2



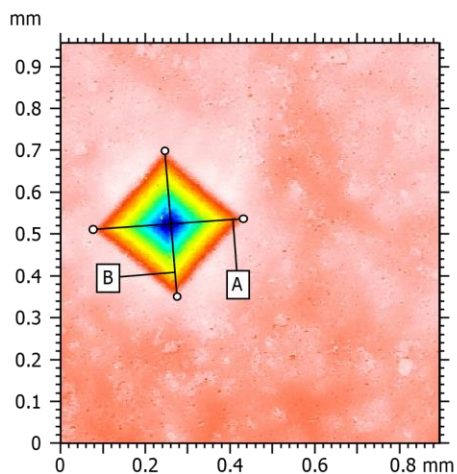
ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS (PERFILÓMETRO)



Parameters	Value	Unit
Length	0.873	mm

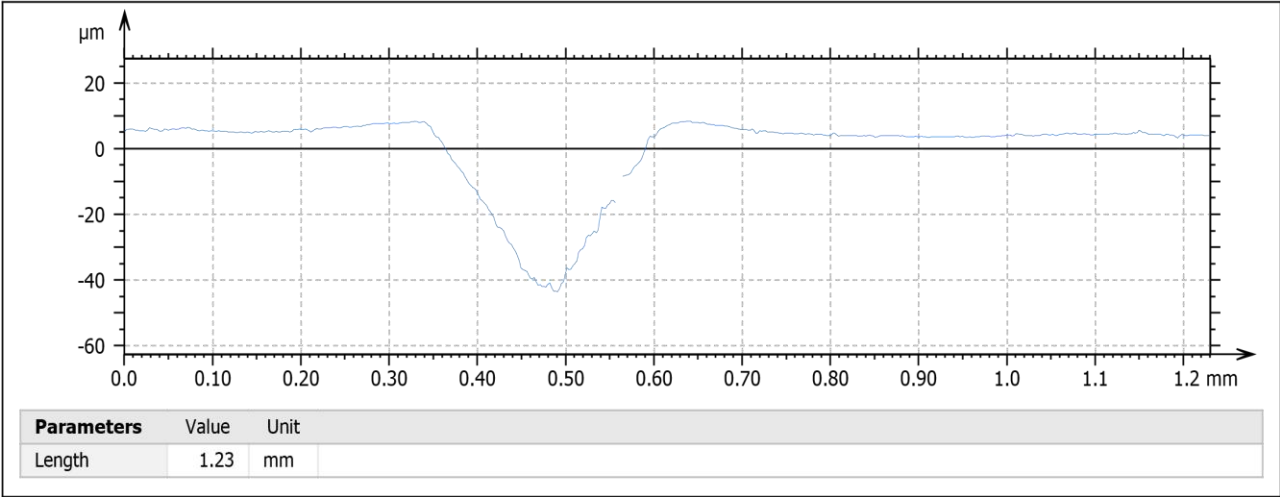
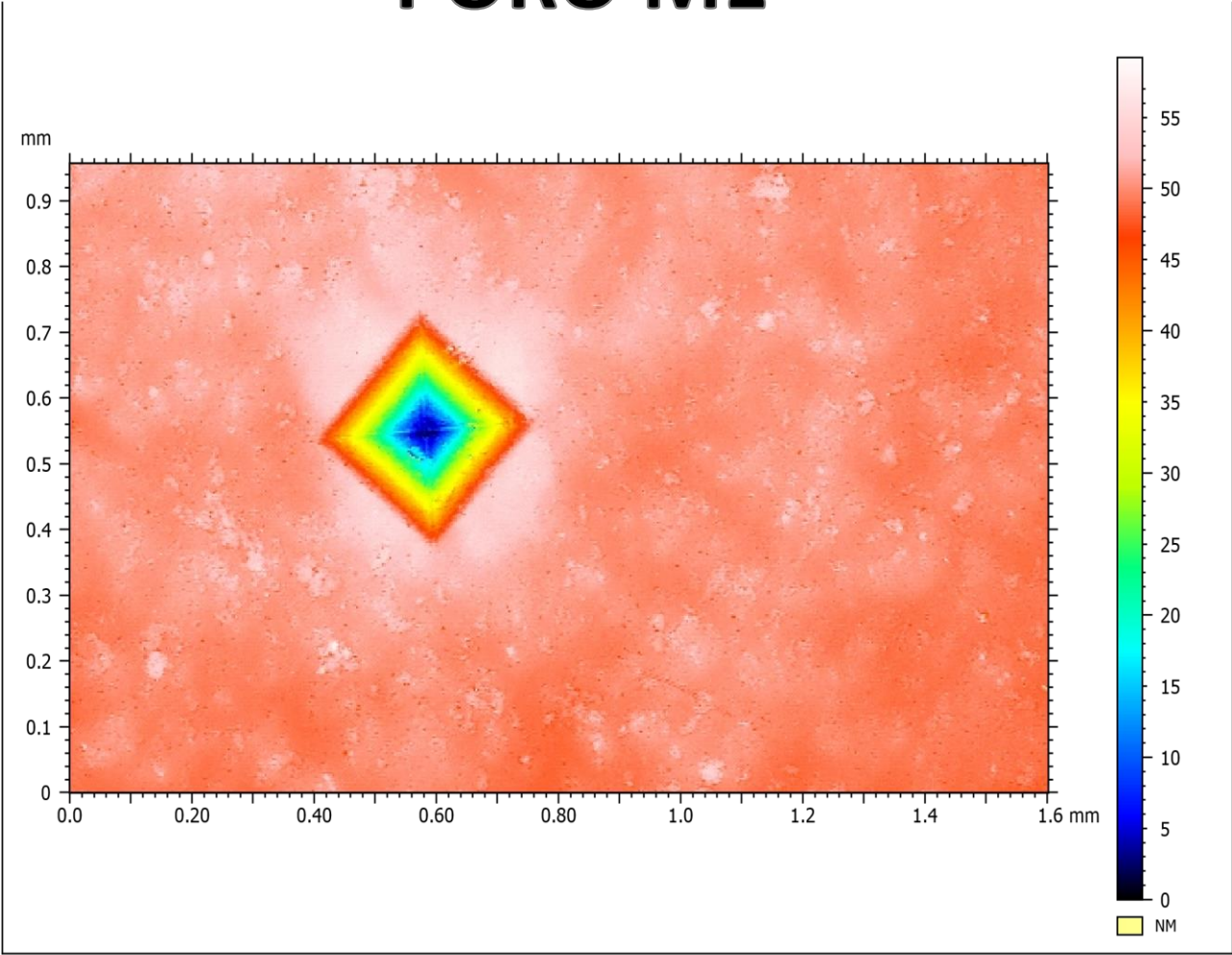


Parameters	Step 1	Unit
Width	0.0658	mm
Maximum height	48.7	μm
Mean height	47.7	μm



Distances	Unit	A	B
HDist	mm	0.356	0.349

PORO M1



ANEXO B: MEDICIONES TOPOGRÁFICAS (PERFILÓMETRO)

